

Recherche sur l'effet de l'état de surface sur la qualité d'anodisation de pièces en aluminium usinées

par

Martin CHAVECA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 19 SEPTEMBRE 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Martin Chaveca, 2025



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean-François Chatelain, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Vincent Demers, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Omur Dagdeviren, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 12 SEPTEMBRE 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à présenter mes remerciements à mon directeur de recherche et professeur Jean-François Chatelain pour ses précieux conseils et sa guidance tout au long de ce travail.

À mes parents et amis pour leur support et encouragements, avec une mention spéciale à Antoine Collin pour m'avoir offert son aide inconditionnelle à maintes reprises depuis le tout début de mes études.

À mes collègues présents et passés chez SMP Tech pour avoir maintenu une dynamique novatrice et enrichissante, autant au niveau personnel que professionnel, démontrant une fois de plus que les petites entreprises peuvent être à l'avant-garde de la recherche et l'innovation. Un remerciement particulier à Sébastien Baril pour m'avoir alloué autant de temps pour mes études et pour son inestimable mentorat depuis tant d'années.

Au Fonds de recherche du Québec (FRQ), au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour m'avoir octroyé des bourses de recherche et à SMP Tech pour avoir financé cette recherche.

Recherche sur l'effet de l'état de surface sur la qualité d'anodisation de pièces en aluminium usinées

Martin CHAVECA

RÉSUMÉ

L'anodisation de pièces en aluminium est couramment pratiquée en industrie, notamment pour améliorer les propriétés de surface de pièces usinées et leur ajouter une coloration esthétique. Des défauts d'usinage difficilement perceptibles peuvent être accentués par l'anodisation et forcer la mise au rebut de ces pièces. Alors que des techniques en laboratoire permettent de détecter ces défauts, la majorité des entreprises d'usinage ne possèdent pas ces ressources. Cette recherche a donc pour but d'explorer l'effet de l'état de surface des pièces en aluminium usinées sur la qualité de l'anodisation en utilisant de l'équipement industriel courant, dans l'optique de pouvoir détecter et corriger ces défauts en amont.

Des échantillons d'aluminium 6061-T6511 seront usinés avec des outils et paramètres de coupe variés pour produire un large éventail d'états de surface dans le but de généraliser une potentielle relation. L'état de surface sera analysé par un rugosimètre linéaire et la qualité de l'anodisation par un réflectomètre. Après une validation des mesures et des instruments de mesure, il sera relevé que l'anodisation diminue la réflectivité d'une surface usinée selon l'angle d'incidence du faisceau réfléchi. Un algorithme sera développé pour analyser l'ensemble des données, mais aucune relation générale valable entre rugosité et réflectivité ne peut être établie.

Mots clés : aluminium, anodisation, réflectivité, rugosité, usinage

Research on the effect of surface finish on the anodizing quality of machined aluminum parts

Martin CHAVECA

ABSTRACT

Anodizing of aluminum parts is commonly practiced in industry, in particular to improve the surface properties of machined parts and add aesthetic coloration. Machining defects that are difficult to perceive can be accentuated by anodizing and force the scrapping of these parts. While laboratory techniques can detect these defects, most machining companies do not have such resources. The aim of this research is to explore the effect of the surface finish of machined aluminum parts on the quality of anodizing using common industrial equipment, with the goal of being able to detect and correct these defects upstream.

Samples of 6061-T6511 aluminum will be machined with various tools and cutting parameters to produce a wide range of surface finishes in order to generalize a potential correlation. The surface finish will be analyzed by a linear roughness meter and the quality of the anodization by a reflectometer. After validation of the measurements and measuring instruments, it will be noted that anodizing decreases the reflectivity of a machined surface according to the angle of incidence of the reflected beam. An algorithm will be developed to analyze the dataset, but no valid general relationship between roughness and reflectivity can be established.

Keywords: aluminum, anodizing, reflectivity, roughness, machining

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Anodisation de l'aluminium	3
1.1.1 Présentation générale de l'anodisation.....	3
1.1.2 Anodisation dans un bain d'acide sulfurique.....	3
1.1.3 Rinçage	6
1.1.4 Scellage	6
1.2 États de surface	7
1.2.1 Mesure linéaire de la rugosité	7
1.2.2 Mesure surfacique de la rugosité	11
1.2.3 Mesure de la réflectivité.....	13
1.2.4 Relation entre usinage et état de surface.....	15
1.2.5 Relation entre état de surface et réflectivité.....	18
1.3 Relation entre état de surface et qualité de l'anodisation	19
1.3.1 Impact de la microstructure	19
1.3.2 Impact de la rugosité.....	22
1.4 Revue critique de la littérature.....	23
CHAPITRE 2 EXPÉRIMENTATION.....	25
2.1 Présentation de l'expérimentation.....	25
2.2 Échantillons.....	26
2.3 Choix des outils.....	27
2.4 Parcours d'usinage des outils.....	29
2.4.1 Parcours de l'outil A	30
2.4.2 Parcours des outils B, C et D	31
2.4.3 Parcours de l'outil E.....	32
2.4.4 Parcours de l'outil F.....	33
2.5 Paramètres de coupe du premier groupe d'échantillons	34
2.6 Paramètres de coupe du second groupe d'échantillons.....	36
2.7 Montage et machine.....	36
2.8 Mesure de l'état de surface	37
2.9 Mesure de la réflectivité.....	40
2.10 Anodisation.....	42
2.11 Estimation de la précision et répétabilité des instruments de mesure.....	42
CHAPITRE 3 RÉSULTATS.....	45
3.1 Erreur des instruments de mesure	45
3.1.1 Erreur du rugosimètre	45
3.1.2 Erreur du réflectomètre	46
3.2 Validation du plan d'expérience	48

3.2.1	Effet des paramètres de coupe sur l'état de surface	48
3.2.2	Effet de l'usure d'outil sur l'état de surface.....	49
3.3	Effet de l'anodisation sur la réflectivité.....	50
3.4	Effet de l'état de surface sur la réflectivité	52
3.4.1	Analyse préliminaire des données	53
3.4.1.1	Test de normalité.....	53
3.4.1.2	Test de données aberrantes	54
3.4.2	Transformation des données pour une analyse linéaire	57
3.4.3	Recherche de corrélations	59
3.4.3.1	Tri préliminaire des paramètres	61
3.4.3.2	Sélection itérative des paramètres.....	62
3.4.3.3	Génération des combinaisons de paramètres	62
3.4.3.4	Régression linéaire sur les paramètres	62
3.4.3.5	Tests statistiques sur les régressions	63
3.4.3.6	Analyse des modèles de régression trouvés par l'algorithme	64
3.4.4	Résultat de la recherche de corrélations.....	65
CHAPITRE 4	INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	67
4.1	Effet de l'anodisation sur la réflectivité.....	67
4.2	Effet de l'état de surface sur la réflectivité	70
CHAPITRE 5	DISCUSSION	79
5.1	Plan d'expérience prévu et observé	79
5.2	Relation entre état de surface et réflectivité.....	80
5.3	Relation entre réflectivités avant et après anodisation.....	80
5.4	Effet de l'état de surface sur la qualité du procédé d'anodisation	81
CONCLUSION.....		83
ANNEXE I	MESURES DE LA RUGOSITÉ.....	85
ANNEXE II	PARAMÈTRES DE COUPE DES OUTILS	93
ANNEXE III	CERTIFICAT DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES ÉCHANTILLONS	97
ANNEXE IV	CALCULS DES ERREURS DES INSTRUMENTS	99
ANNEXE V	ALGORITHMES DE RECHERCHE DE RÉGRESSIONS	103
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		119

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Mesures linéaires de la rugosité9
Tableau 1.2	Mesures surfaciques de la rugosité12
Tableau 2.1	Outils utilisés28
Tableau 2.2	Codage des paramètres de coupe35
Tableau 2.3	Paramètres de coupe de l'outil A.....35
Tableau 2.4	Paramètres de coupe pour le second groupe d'échantillons36
Tableau 3.1	Erreurs du rugosimètre.....45
Tableau 3.2	Erreurs du réflectomètre47
Tableau 3.3	Équations de la réflectivité après anodisation en fonction de la réflectivité avant anodisation52
Tableau 3.4	Données aberrantes56
Tableau 3.5	Exemple de transformation des données.....57
Tableau 3.6	Transformations des paramètres d'état de surface58
Tableau 3.7	Transformations des paramètres de réflectivité59
Tableau 3.8	Tests statistiques effectués sur les régressions.....64
Tableau 4.1	Modèles de prédiction ajustés par outil72

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Bassin d'anodisation.....4
Figure 1.2	Formation de la couche d'oxyde par l'anodisation5
Figure 1.3	Variation de la croissance de la couche d'oxyde pour un aluminium pur théorique (a) et un alliage d'aluminium réaliste (b).....6
Figure 1.4	Représentation d'une mesure linéaire de surface8
Figure 1.5	Représentation du Ra8
Figure 1.6	Représentation de différents Rsk10
Figure 1.7	Représentation de différents Rku.....11
Figure 1.8	Représentation du Sa.....12
Figure 1.9	Schéma d'une lecture de réflectivité selon la norme ISO 766814
Figure 1.10	Représentation géométrique du profil de coupe théorique16
Figure 1.11	Formation de rainures limites entre grains après attaque à l'acide20
Figure 1.12	Vue de coupe d'une extrusion d'aluminium anodisée avec défauts20
Figure 1.13	Vue de coupe du film anodique : (a) et (c) sont normaux, (b) et (d) sont décolorés21
Figure 2.1	Dimensions d'un échantillon.....27
Figure 2.2	Parcours de l'outil A.....30
Figure 2.3	Zones de passage unique (A) et de chevauchement (B) pour l'outil A.....31
Figure 2.4	Parcours des outils B, C et D31
Figure 2.5	Zones de passage unique (A) et de chevauchement (B) pour les outils B, C et D32
Figure 2.6	Parcours de l'outil E32
Figure 2.7	Zones de passage unique (A) et de chevauchement (B) pour l'outil E33

Figure 2.8	Parcours de l'outil F	33
Figure 2.9	Zones de chevauchement pour l'outil F	34
Figure 2.10	Montage de l'échantillon et du bloc de plastique dans la machine	37
Figure 2.11	Mesures de rugosité prises dans les zones de passage unique (A) et de chevauchement (B)	38
Figure 2.12	Gabarits pour la mesure de la rugosité.....	39
Figure 2.13	Espaceurs de 1mm pour les gabarits de mesure de la rugosité	39
Figure 2.14	Mesures de réflectivité prises dans les zones de passage unique (A) et de chevauchement (B).....	40
Figure 2.15	Gabarits pour la mesure de la réflectivité	41
Figure 2.16	Mesures de la réflectivité dans des directions opposées sur un même gabarit	41
Figure 2.17	Échantillons brut, usiné et anodisé.....	42
Figure 2.18	Étalon de référence pour les mesures de rugosité	43
Figure 2.19	Étalon de référence pour les mesures de réflectivité	43
Figure 3.1	Mesures du Ra de l'étalon et plage d'erreur	46
Figure 3.2	Mesures du Rz de l'étalon et plage d'erreur	46
Figure 3.3	Mesures à 20° de l'étalon et plage d'erreur	47
Figure 3.4	Mesures à 60° de l'étalon et plage d'erreur	48
Figure 3.5	Mesures à 85° de l'étalon et plage d'erreur	48
Figure 3.6	Ra selon les paramètres de coupe	49
Figure 3.7	Ra selon l'usure d'outil	50
Figure 3.8	Réflectivité à 20° avant et après anodisation	51
Figure 3.9	Réflectivité à 60° avant et après anodisation	51
Figure 3.10	Réflectivité à 85° avant et après anodisation	52
Figure 3.11	Distribution des mesures du paramètre Rsk.....	53

Figure 3.12	Distributions des mesures de la réflectivité à 20°, 60° et 85°	54
Figure 3.13	Numérotation des mesures	55
Figure 3.14	Organigramme de l'algorithme	60
Figure 3.15	Valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées	65
Figure 3.16	Valeurs prédites en fonction des valeurs mesurées.....	66
Figure 4.1	Réflectivités avant et après anodisation selon l'angle d'incidence reliées par une surface libre.....	67
Figure 4.2	Réflectivités avant et après anodisation selon l'angle et écart du modèle .	68
Figure 4.3	Histogrammes des erreurs nominales, minimisées et maximisées	69
Figure 4.4	Réflectivité prédite pour l'outil E.....	71
Figure 4.5	Réflectivité prédite par outil	72
Figure 4.6	Modèle de prédiction biaisé de la réflectivité à 60° avec droite d'ajustement.....	74
Figure 4.7	Histogramme du résidu d'un modèle biaisé.....	74
Figure 4.8	Valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites d'un modèle biaisé...	75
Figure 4.9	Corrélations entre la mesure du Ra et d'autres paramètres mesurés	76
Figure 4.10	Corrélations entre la mesure de la réflectivité à 60° et des paramètres d'état de surface	77

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BRDF	Bidirectional reflectance-distribution function
ISO	Organisation Internationale de Normalisation

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

m	Mètre (unité de longueur)
mm	Millimètre (10^{-3} m) (unité de longueur)
μm	Micromètre (10^{-6} m) (unité de longueur)
nm	Nanomètre (10^{-9} m) (unité de longueur)
N*m	Newton par mètre (unité de couple)
°C	Degré Celsius (unité de température)
°	Degré (unité d'angle)
GU	<i>Gloss Unit</i> (unité de réflectivité)
Ra	<i>Roughness average</i> , hauteur moyenne (unité de rugosité linéaire)
Rq	Écart moyen de la hauteur au carré (unité de rugosité linéaire)
Rp	Hauteur de pic maximale (unité de rugosité linéaire)
Rv	Profondeur de vallée maximale (unité de rugosité linéaire)
Rz	Variation de hauteur sur la longueur de base (unité de rugosité linéaire)
Rt	Variation de hauteur sur la longueur d'évaluation (unité de rugosité linéaire)
RSm	Espacement moyen des éléments (unité de rugosité linéaire)
RDq	Écart moyen au carré de la pente du profil (unité de rugosité linéaire)
Rsk	Obliquité de la distribution (unité de rugosité linéaire)
Rku	Étalement de la distribution (unité de rugosité linéaire)
Sa	<i>Surface average</i> , hauteur moyenne (unité de rugosité surfacique)
Sq	Écart moyen de la hauteur au carré (unité de rugosité surfacique)
Sp	Hauteur de pic maximale (unité de rugosité surfacique)
Sv	Profondeur de vallée maximale (unité de rugosité surfacique)

XXII

Sz	Variation maximale de la hauteur (unité de rugosité surfacique)
Ssk	Obliquité de la distribution (unité de rugosité surfacique)
Sku	Étalement de la distribution (unité de rugosité surfacique)
R^2 ajusté	Facteur de corrélation (unité adimensionnelle)

INTRODUCTION

L'anodisation de l'aluminium est un procédé utilisé industriellement depuis des décennies pour ses propriétés et son esthétique. Beaucoup plus mince et durable que la peinture, ce traitement améliore les propriétés mécaniques et chimiques de la surface et il est possible d'y ajouter une coloration, faisant ainsi de l'anodisation un procédé de choix pour la finition d'une pièce.

Comme tout procédé, l'anodisation est susceptible aux défauts, qui apparaissent souvent sous forme de décoloration ou noircissement localisés. Ces défauts sont d'autant plus problématiques en considérant que l'anodisation est généralement la dernière étape du processus de fabrication d'une pièce, donc lorsque sa valeur ajoutée est la plus grande.

Cette problématique est celle du partenaire industriel de cette recherche, SMP Tech Inc, un atelier d'usinage qui fait régulièrement anodiser des pièces usinées à haute valeur ajoutée en aluminium 6061. Ces défauts, pour la plupart esthétiques, sont présumés provenir du procédé d'usinage, mais sont difficilement détectables par un contrôle visuel avant l'anodisation et forcent la mise au rebut de pièces autrement fonctionnelles. Une détection en amont de ces défauts permettrait de corriger le procédé d'usinage immédiatement, réduisant les rejets après anodisation et optimisant ainsi le processus global de fabrication.

Bien que des méthodes d'analyse permettent de détecter avant l'anodisation des défauts susceptibles de ressortir, elles sont généralement conscrrites à des laboratoires de recherche ou des grandes entreprises qui possèdent de l'équipement d'inspection de la microstructure d'une pièce métallique. Nécessitant des ressources financières et temporelles importantes, ce genre d'analyse n'est pas adaptée à un contexte de production industrielle de petits lots variés de pièces complexes.

Le but de ce travail est donc de rechercher l'effet de l'état de surface sur la qualité d'anodisation des pièces en aluminium usinées par l'utilisation d'équipements courants dans l'industrie manufacturière, soit un rugosimètre et un réflectomètre.

Une revue de littérature permettra de bien cerner le sujet et de mettre en contexte cette recherche par rapport aux travaux d'autres chercheurs. Suivra une présentation de la méthodologie d'expérimentation et les résultats de son application. Finalement, une interprétation des résultats et une discussion concluront ce travail.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Anodisation de l'aluminium

1.1.1 Présentation générale de l'anodisation

L'anodisation de l'aluminium est un traitement de surface qui ajoute une mince couche protectrice sans affecter les propriétés internes de la pièce. L'anodisation confère notamment une plus grande résistance à la corrosion et au frottement, augmente la dureté et diminue la conductivité électrique (Diggle, Downie, & Goulding, 1969 ; Scamponi & Timelli, 2022). L'utilisation de colorant ajoute aussi un aspect esthétique. Il s'agit d'un procédé très répandu et utilisé depuis près d'un siècle, les premières applications industrielles remontent aux années 1930 (de Sousa Araujo, Milagre, & Costa, 2023).

Il existe de nombreuses variantes au procédé d'anodisation, celle considérée dans le cadre de ce travail est l'anodisation sulfurique de type II telle que décrite dans la norme MIL-PRF-8625F (United States Department of Defense, 2020). L'anodisation suit généralement les trois mêmes étapes principales : anodisation dans un bain acide, rinçage et scellage. Des étapes préparatoires de préparation de surface et de nettoyage peuvent aussi être ajoutées, mais ne font pas partie intégrante du procédé.

1.1.2 Anodisation dans un bain d'acide sulfurique

L'étape d'anodisation consiste à submerger la pièce d'aluminium dans un réservoir d'électrolyte – l'acide sulfurique dans ce cas-ci – et d'y faire passer un courant électrique (Figure 1.1). La cathode est généralement faite d'aluminium pour réduire l'énergie requise, mais peut aussi être de plomb, de carbone ou d'acier inoxydable (C. A. Grubbs, 2007). L'anode est la pièce à anodiser, d'où le nom du procédé.

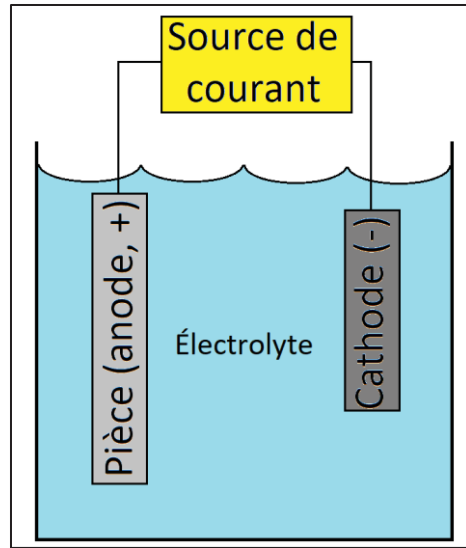


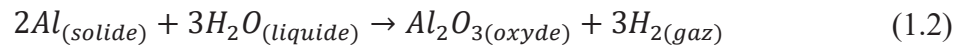
Figure 1.1 Bassin d'anodisation

L'électrolyte est utilisé pour faciliter la réaction chimique par la séparation des molécules d'eau en ions (C. A. Grubbs, 2007).



Adaptée de Scampone & Timelli (2022, p. 1)

En appliquant une différence de potentiel, les atomes d'aluminium (Al) libèrent leurs électrons ($Al^{3+} + 3e^-$) qui réagissent avec les ions d'oxygène pour former une couche d'oxyde, l'hydrogène étant évacué sous forme de gaz (de Sousa Araujo et al., 2023 ; Scampone & Timelli, 2022).



Adaptée de Scampone & Timelli (2022, p. 1)

La couche d'oxyde se sous-divise en une mince couche étanche de 10 à 100nm d'épaisseur et d'une épaisse couche poreuse de 2 à 25µm d'épaisseur, pour une distribution de 40% en pénétration dans la surface et 60% en croissance (Korzekwa, 2023 ; United States Department of Defense, 2020). L'oxyde de la couche poreuse est de forme colonnaire

hexagonale avec des pores cylindriques normaux à la surface (Figure 1.2). C'est cette formation qui est responsable de l'augmentation de la dureté et de la résistance au frottement (Diggle et al., 1969 ; Scampono & Timelli, 2022).

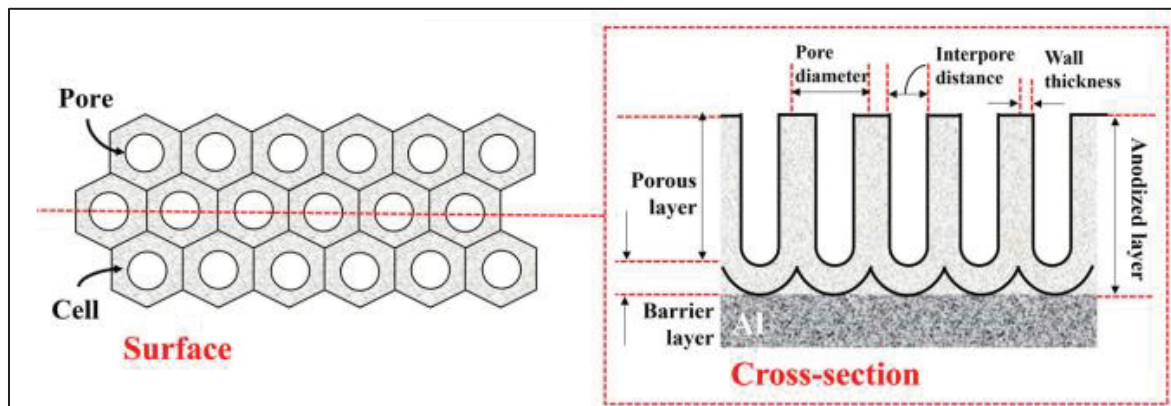


Figure 1.2 Formation de la couche d'oxyde par l'anodisation

Adaptée de Sousa et al. (2023, p. 6)

Comme la croissance de la couche d'oxyde se fait perpendiculairement à la surface, des variations de l'état de surface peuvent entraîner des irrégularités dans la formation des colonnes, tel qu'illustré à la Figure 1.3 (Scampono & Giulio, 2024). Aussi, les éléments d'alliage ont un effet en modifiant la vitesse de croissance de la couche par endroits (Aggerbeck et al., 2014 ; de Sousa Araujo et al., 2023 ; Korzekwa, 2023).

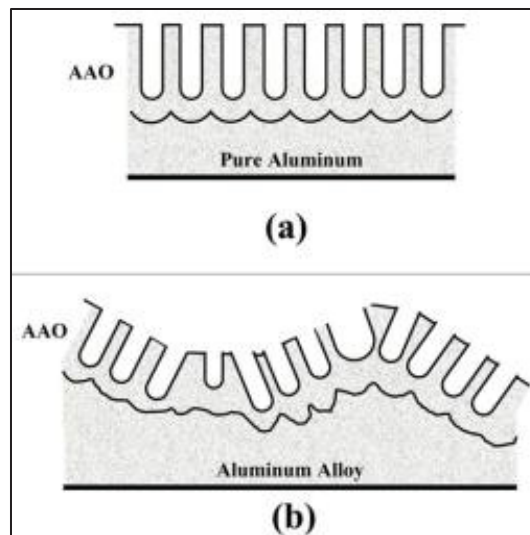


Figure 1.3 Variation de la croissance de la couche d'oxyde pour un aluminium pur théorique (a) et un alliage d'aluminium réaliste (b)

Tirée de Sousa et al. (2023, p. 3)

Outre le type d'électrolyte utilisé, de nombreux facteurs influent sur les propriétés de la couche d'oxyde, notamment le courant et la tension appliqués, la température du bain, le temps, le matériau de la cathode, l'agitation du bain, etc. (de Sousa Araujo et al., 2023 ; Diggle et al., 1969 ; C. A. Grubbs, 2007 ; Korzekwa, 2023 ; Wong et al., 2017).

1.1.3 Rinçage

Cette étape consiste à rincer la pièce dans des bassins d'eau distillée pour retirer le film d'électrolyte restant sur la pièce ainsi que des impuretés qui s'accrochent à sa surface. Jusqu'à trois bassins peuvent être utilisés pour s'assurer de la propreté de la pièce (C. A. Grubbs, 2007).

1.1.4 Scellage

L'étape de scellage vise à augmenter la résistance à la corrosion de la couche d'oxyde poreuse en plongeant la pièce dans un bassin d'eau légèrement acide ($6 < \text{pH} < 7$) à haute

température ($>95^{\circ}\text{C}$). La surface poreuse est remplie par la boehmite, une structure cristalline de $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$. C'est à cette étape que des colorants peuvent être ajoutés et scellés dans les pores (Diggle et al., 1969 ; C. A. Grubbs, 2007 ; Ofoegbu, Fernandes, & Pereira, 2020).

1.2 États de surface

La topologie d'une surface ne pouvant être représentée exactement qu'avec un minimum de trois dimensions, différents types de mesures sont utilisés pour ramener à une seule dimension une caractéristique spécifique d'une surface. En réduisant la dimensionnalité de la mesure, elle devient plus facile à analyser, mais réduit aussi l'information qu'on peut en tirer. Il est donc important de mesurer une surface de plusieurs façons pour bien la caractériser. La rugosité sera ici étudiée pour caractériser le profil de forme de la surface après usinage.

1.2.1 Mesure linéaire de la rugosité

La mesure linéaire de la rugosité consiste à évaluer le long d'une droite de longueur définie projetée sur la surface les variations de hauteur de cette surface. Elle est généralement mesurée avec un rugosimètre, qui déplace un stylet avec une pointe fine sur la surface pour en mesurer les variations.

Afin de mesurer adéquatement le profil d'une surface, il faut distinguer sa rugosité de son ondulation. Tel qu'illustré à la Figure 1.4, la rugosité (*roughness*) consiste en des irrégularités saillantes peu espacées, tandis que l'ondulation (*waviness*) concerne la variation de forme de la surface sur une plus grande échelle de distance. Plusieurs mesures de rugosité visent à éliminer l'effet de l'ondulation en ramenant le profil de forme vers une droite. Pour ce faire, la longueur d'évaluation L est divisée en longueurs de base l_i dans lesquelles une ligne moyenne du profil est calculée. Cette ligne moyenne sert ensuite de base pour calculer les variations de hauteur du profil.

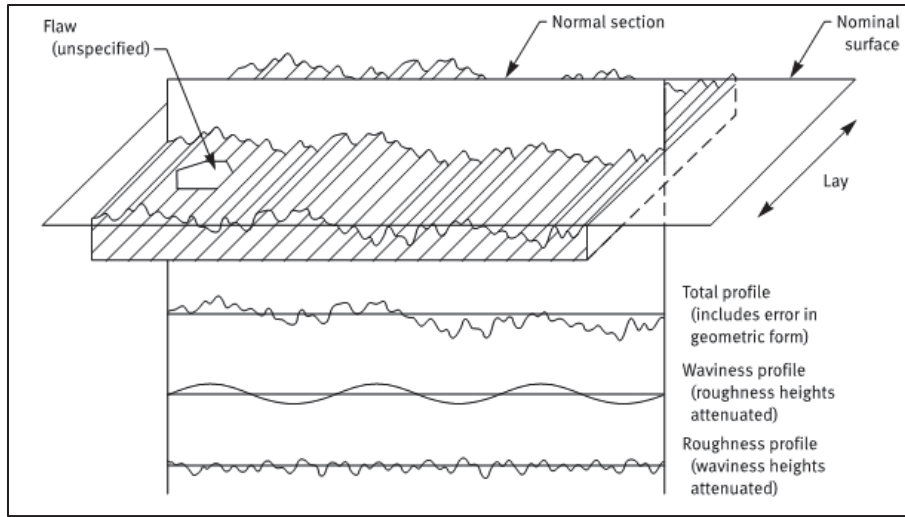


Figure 1.4 Représentation d'une mesure linéaire de surface
Tirée de ASME B46.1 (2019, p. 2)

Parmi les nombreuses mesures possibles de la rugosité, le R_a (*Roughness average* ou rugosité moyenne) est très couramment utilisé, puisqu'il en donne un aperçu global. Son calcul est la moyenne arithmétique de la distance absolue des pics et vallées $Z(x)$ par rapport à la longueur de base l (Figure 1.5). Il est peu affecté par l'ondulation et par les irrégularités, car le calcul d'une moyenne tend à réduire l'effet des points extrêmes.

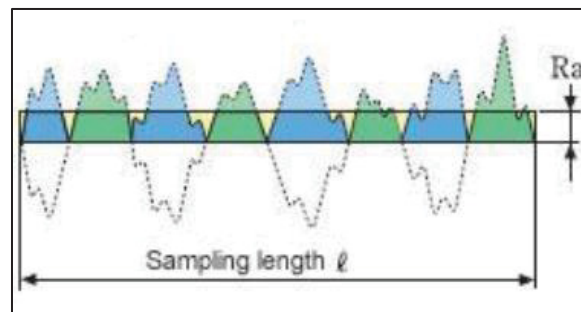


Figure 1.5 Représentation du R_a
Tirée de Aidibe (2015, p. 7)

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1.3)$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 7)

Le Tableau 1.1 présente quelques-unes des mesures linéaires de la rugosité ainsi que leurs applications (Aidibe, 2015 ; ASME, 2019). Les calculs associés à ces mesures sont disponibles à l'ANNEXE I.

Tableau 1.1 Mesures linéaires de la rugosité

Mesure	Caractéristique mesurée	Usage
Ra	Hauteur moyenne	Aperçu global en diminuant l'effet des extrêmes
Rq	Écart moyen de la hauteur au carré	Aperçu global en tenant compte des extrêmes
Rp	Hauteur de pic maximale	
Rv	Profondeur de vallée maximale	
Rz	Variation maximale de hauteur sur la longueur de base	Évaluation de la réflectivité, l'aptitude aux traitements de surface et la force de surface et de friction
Rt	Variation maximale de hauteur sur l'ensemble de la longueur d'évaluation	Évaluation de la réflectivité, l'aptitude aux traitements de surface et la force de surface et de friction
RSm	Espacement moyen des éléments avec une discrimination en hauteur de 10% de Rz et en largeur de 1% de la longueur de base	Évaluation de la réflectivité, l'aptitude aux traitements de surface et la force de surface et de friction
RDq	Écart moyen au carré de la pente du profil sur la longueur d'évaluation	Évaluation de la réflectivité, l'aptitude aux traitements de surface et la force de surface et de friction

Il existe aussi des indicateurs statistiques du profil mesuré qui informent sur la distribution des variations de la surface.

Le Rsk mesure l'obliquité de la distribution (*skewness*) des pics et vallées par rapport à la ligne moyenne. Un $Rsk < 0$ signifie une distribution supérieure à la ligne moyenne, un $Rsk > 0$ signifie une distribution inférieure à la ligne moyenne et un $Rsk = 0$ signifie une distribution symétrique (Figure 1.6). Un Rsk négatif indique généralement une meilleure résistance à l'abrasion qu'un Rsk positif (Aidibe, 2015).

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left(\frac{1}{l} \int_0^l Z^3(x) dx \right) \quad (1.4)$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 7)

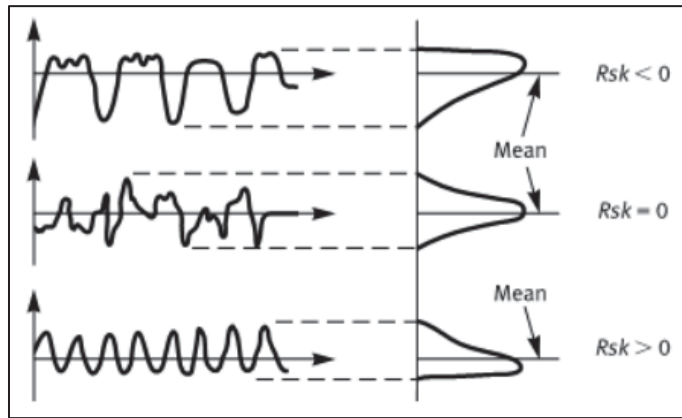


Figure 1.6 Représentation de différents Rsk

Tirée de ASME B46.1 (2019, p. 15)

Le Rku mesure l'étalement de la distribution (*kurtosis*) en évaluant l'acuité des pics et vallées. Un $Rku < 3$ signifie un profil plutôt pointu, un $Rku > 3$ signifie un profil plutôt arrondi et un $Rku = 3$ signifie un profil normal (Figure 1.7). Le Rku peut être utilisé pour évaluer la réflectivité (Aidibe, 2015).

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left(\frac{1}{l} \int_0^l Z^4(x) dx \right) \quad (1.5)$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 8)

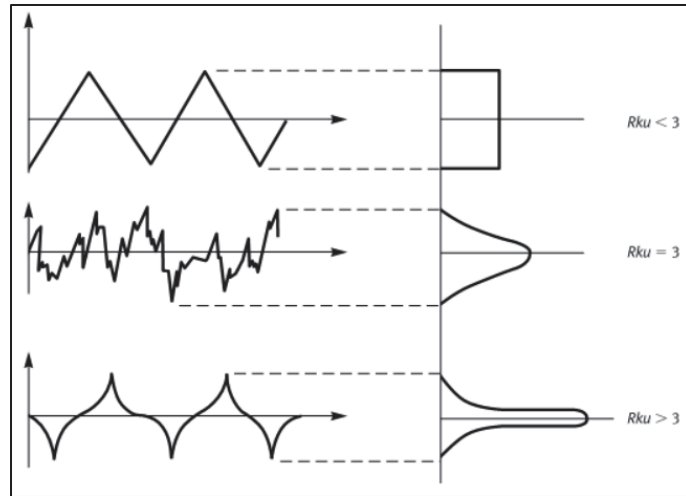


Figure 1.7 Représentation de différents Rku

Tirée de ASME B46.1 (2019, p. 14)

1.2.2 Mesure surfacique de la rugosité

Bien que les mesures linéaires de la rugosité permettent d'obtenir rapidement de nombreux renseignements sur l'état de surface, elles ne mesurent qu'une région restreinte de la surface, soit une ligne. De plus, la direction de la mesure et son emplacement sur la surface peuvent altérer le résultat, considérant qu'une surface usinée peut posséder des variations de profil. Étendues des mesures linéaires, les mesures surfaciques sont une alternative intéressante. De façon similaire aux mesures linéaires, une surface de référence moyenne est définie pour réduire l'effet de l'ondulation sur la rugosité.

Étendu du Ra, le Sa (*Surface average*) calcule la moyenne arithmétique de la distance absolue des pics et vallées par rapport à la surface de référence d'aire A (Figure 1.8).

$$Sa = \frac{1}{A} \int_0^{Ly} \int_0^{Lx} |Z(x, y)| dx dy \quad (1.6)$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 13)

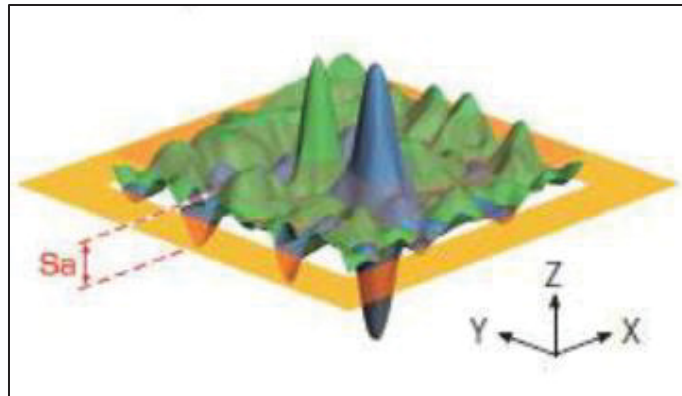


Figure 1.8 Représentation du Sa

Tirée de Aidibe (2015, p. 13)

Le Tableau 1.2 présente quelques-unes des mesures surfaciques de la rugosité ainsi que leurs applications (Aidibe, 2015). Les calculs associés à ces mesures sont disponibles à l'ANNEXE I.

Tableau 1.2 Mesures surfaciques de la rugosité

Mesure	Caractéristique mesurée	Usage
Sa	Hauteur moyenne	Aperçu global en diminuant l'effet des extrêmes
Sq	Écart moyen de la hauteur au carré	Aperçu global en tenant compte des extrêmes
Sp	Hauteur de pic maximale	
Sv	Profondeur de vallée maximale	
Sz	Variation maximale de hauteur sur la surface	Évaluation de la réflectivité, l'aptitude aux traitements de surface et la force de surface et de friction

De même que pour les mesures linéaires, des indicateurs statistiques informent sur la distribution du profil mesuré.

Étendu de Rsk, le Ssk mesure l'obliquité de la distribution (*skewness*) des pics et vallées par rapport à la surface de référence. Un Ssk<0 signifie une distribution supérieure à la surface de référence, un Ssk>0 signifie une distribution inférieure à la surface de référence et un Ssk=0 signifie une distribution symétrique.

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \left(\frac{1}{A} \int_0^{Ly} \int_0^{Lx} Z^3(x,y) dx dy \right) \quad (1.7)$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 14)

Étendu de Rku, le Sku mesure l'étalement de la distribution (*kurtosis*) en évaluant l'acuité des pics et vallées. Un Sku<3 signifie un profil plutôt pointu, un Sku>3 signifie un profil plutôt arrondi et un Sku=3 signifie un profil normal.

$$Sku = \frac{1}{Sq^4} \left(\frac{1}{A} \int_0^{Ly} \int_0^{Lx} Z^4(x,y) dx dy \right) \quad (1.8)$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 14)

1.2.3 Mesure de la réflectivité

La réflectivité est le rapport de lumière réfléchi à celle incidente sur une surface et varie selon l'angle d'incidence du rayon lumineux de même que par la direction de la mesure. La réflectivité d'une surface peut affecter des comportements physiques, tels que le ratio d'absorption d'énergie provenant d'un laser (Zohuri, 2021), mais affecte aussi l'aspect esthétique.

La mesure de la réflectivité d'une surface est complexe et évalue généralement la réflexion spéculaire dans un angle donné (ASTM, 2008). De nombreux types de mesures de la réflexion existent – autant spéculaires, diffuses et combinées – afin de contrôler la propriété spécifique recherchée. Ces mesures sont pour la plupart effectuées en laboratoire avec des sources de lumière artificielle à l'aide d'un goniomètre (Chadwick & Kentridge, 2015).

La norme ISO 7668 (Anodisation de l'aluminium et de ses alliages – Mesurage des caractéristiques de réflectivité et de brillant spéculaires des couches anodiques à angle fixe de 20°, 45°, 60° ou 85°) (ISO, 2021) décrit comme son nom l'indique la méthode de mesure de la réflectivité de l'aluminium anodisé. Pour respecter la norme, une lecture doit être effectuée avec un appareil qui émet un faisceau lumineux à un angle donné sur une surface et mesurer la quantité réfléchie de ce faisceau par un capteur au même angle, exprimant ce résultat en GU (*Gloss Unit*). La distance entre la surface, l'émetteur et le capteur doit aussi être la même, de façon que l'image source et réfléchie soient identiques, tel que présenté à la Figure 1.9. Une surface de verre noir poli d'une largeur d'au moins 10mm est utilisée pour la calibration et les valeurs de réflectivités doivent être ajustées selon l'index de réfraction du verre utilisé. Dans le but de mieux comparer les résultats, la norme suggère de mesurer les échantillons dans le même sens que l'usinage ou le procédé.

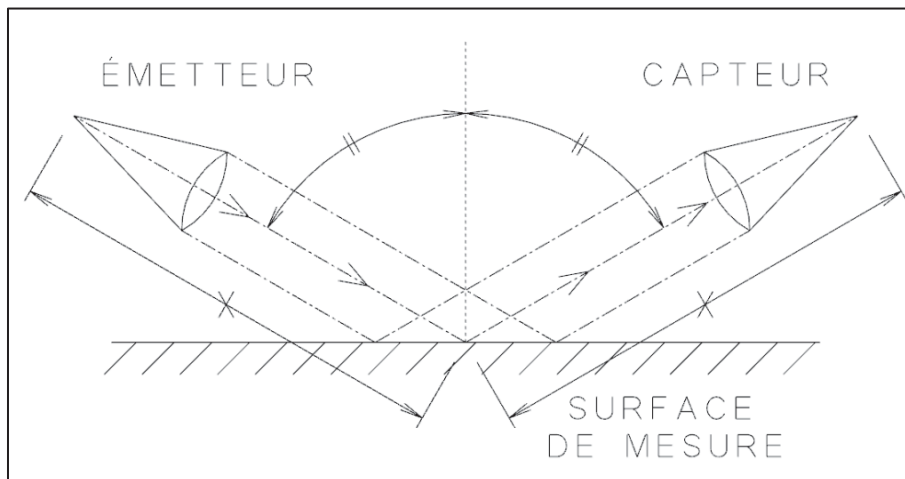


Figure 1.9 Schéma d'une lecture de réflectivité selon la norme ISO 7668

L'aspect esthétique de la réflectivité est difficile à quantifier dû à sa nature subjective. Alors que la mesure en laboratoire s'effectue sous un angle et une région spécifique, l'œil humain peut observer une grande région et de nombreuses orientations simultanément. La couleur de l'objet, la source de lumière, la texture et l'observateur sont quelques-uns des nombreux facteurs qui affectent la perception de la surface (Gigilashvili et al., 2021 ; Litsikas, 1997 ; Šarić & Sole, 2023).

Une difficulté historique de la quantification de la réflectivité est de lier la mesure en laboratoire à une appréciation objective par un observateur humain (Šarić & Sole, 2023). La présence d'un grand nombre de facteurs avec des interactions complexes génère un problème de dimensionnalité trop élevée pour être applicable dans toutes les situations.

1.2.4 Relation entre usinage et état de surface

L'état de surface d'une face usinée peut être décomposé en trois ordres de grandeur : l'ordre macroscopique comporte les déformations du profil de forme telles que la planéité ou la circularité, l'ordre microscopique est composé de la variation fine de la surface telles que les pics et vallées générés par l'outil de coupe et l'ordre moléculaire contient les variations de microstructure et l'oxydation. Ces ordres de grandeur étant influencés par différents phénomènes mécaniques, physiques et thermodynamiques complexes, les modèles généralisés proposés reliant des conditions d'usinage quelconques à l'état de surface demeurent pour l'instant très approximatifs (Srivastava, Gupta, Srivastava, Chauhan, & Chauhan, 2021). Pour obtenir des modèles plus précis et fiables, les conditions d'usinage sont conscrées à des procédés et matériaux déterminés et se concentrent généralement sur l'ordre microscopique.

Les premières recherches visant à prédire l'état de surface se sont concentrées sur l'aspect géométrique de la coupe et la déformation plastique du matériau. En connaissant le rayon de l'outil de coupe et sa vitesse d'avance dans la matière, il est possible de définir le profil de coupe de la surface et d'y appliquer les calculs de rugosité. Par exemple, pour un outil de tournage de rayon R qui a une vitesse d'avance par tour f tel qu'illustré par la Figure 1.10, le Ra peut être approximé par l'équation (1.9).

$$Ra = \frac{f^2}{8R} * 1000 \quad (1.9)$$

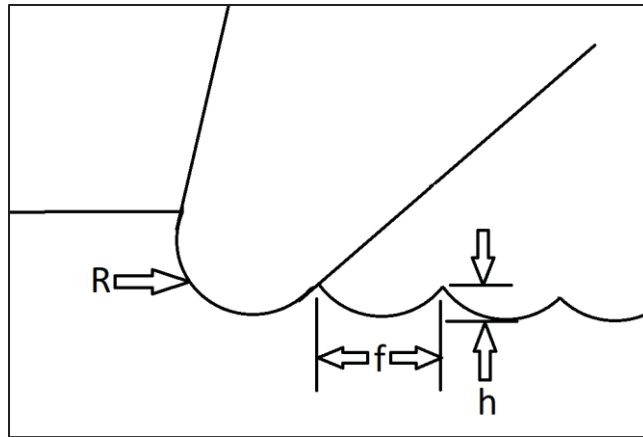


Figure 1.10 Représentation géométrique du profil de coupe théorique

Cette estimation suppose une action de coupe parfaite et néglige tous les phénomènes physiques qui altèrent le profil, ce qui entraîne une sous-estimation de la rugosité réelle (Benardos & Vosniakos, 2003). Grzesik (1996) s'est basé sur ce modèle de base pour y ajouter l'effet de formation du copeau et de déformation plastique du matériau pour affiner la prédiction de la rugosité. Les résultats obtenus corroborent l'hypothèse que les modèles prédictifs de l'état de surface usiné doivent être basés sur des approches expérimentales.

De très nombreux chercheurs ont utilisé l'approche expérimentale pour définir les paramètres d'usinage responsables de la variation des états de surface avec comme résultat logique que la vitesse d'avance est le paramètre commun ayant la plus grande influence (Baek, Ko, & Kim, 2001 ; Benardos & Vosniakos, 2003 ; Najiha, Rahman, & Kadirgama, 2015 ; Srivastava et al., 2021). Parmi les facteurs influents récurrents se trouvent la vitesse de coupe, la profondeur de coupe, la géométrie de l'outil de coupe et son revêtement. Ces recherches expérimentales reposent souvent sur des plans d'expérience de Taguchi ou de surface de réponse, qui ont l'avantage de guider l'expérimentation vers les facteurs les plus importants pour la construction de modèles. Les modèles ainsi obtenus permettent des prédictions précises (corrélations de plus de 90%) et optimisations des paramètres, mais sont généralement très limités dans leur application et ne sont valides que pour le procédé, outil et matériau étudiés.

Il demeure toutefois difficile de tirer des conclusions valides de ces recherches, au point que certaines présentent des résultats opposés malgré une approche similaire. Prakash et al (2018) et Jesuthanam et Pratheesh (2019) ont tous deux effectué une recherche sur l'optimisation des paramètres de coupe en tournage pour l'aluminium en utilisant la méthode de Taguchi : Prakash a démontré que la vitesse d'avance est le paramètre le plus influent et que la profondeur de coupe a le moins d'impact, alors que Jesuthanam a démontré l'inverse.

D'autres chercheurs ont analysé des facteurs externes aux paramètres d'usinage, tels que les erreurs et vibrations induites par la machine (Ehmann & Hong, 1994), l'angle d'attaque de la coupe (Diniz & Filho, 1999), les erreurs géométriques de l'outil (Baek et al., 2001), le fluide de coupe (Najiha et al., 2015), la température, la formation du copeau et la géométrie usinée (Pimenov et al., 2023). Encore une fois, ces recherches démontrent qu'un modèle simple de prédiction d'un état de surface usiné ne peut être atteint, des interactions complexes entre de nombreux facteurs forcent l'analyse au cas par cas des procédés spécifiques.

L'intelligence artificielle et les algorithmes d'apprentissage profond ont démontré dans les dernières années que les modèles d'optimisation des paramètres d'usinage peuvent être construits rapidement et produire des résultats fiables, et ce avec une constante amélioration des résultats (Benardos & Vosniakos, 2003 ; Pimenov et al., 2023). La collecte de données expérimentales demeure toutefois nécessaire.

Quelques chercheurs se sont penchés sur l'impact de l'usinage au niveau de l'ordre moléculaire de l'état de surface. La chaleur générée par l'action de coupe et par l'usure des outils a pour effet dans l'aluminium d'altérer la microstructure de surface et d'augmenter la taille des grains (Fergani, Shao, & Liang, 2014 ; Pimenov et al., 2023). Cet effet est souvent corrélé à la formation du copeau et à la déformation plastique durant l'action de coupe.

Une problématique supplémentaire dans la prédiction d'un état de surface est la variation de ce dernier avec l'usure de l'outil de coupe. Une détérioration graduelle de l'arête tranchante de l'outil se produit durant l'usinage, affectant par le fait même l'action de coupe et

l'intégrité de la surface usinée, ce qui cause une augmentation de la rugosité (Ashrafi, Davoudinejad, & Niazi, 2013 ; Grzesik, 2008). Cette détérioration de l'outil peut éventuellement affecter la surface usinée à l'ordre macroscopique, générant des erreurs de dimensionnalité et de forme (Martins, Gonçalves Carneiro, Ba, & Vieira, 2021).

1.2.5 Relation entre état de surface et réflectivité

Il est généralement accepté qu'une surface plutôt lisse a une réflectivité plutôt spéculaire que diffuse : dans le cas de l'aluminium, ce changement s'effectue autour d'un R_a de $1\mu\text{m}$. La réflexion spéculaire augmente de façon exponentielle sous ce R_a , alors qu'elle est principalement diffuse pour des rugosités supérieures (Babaniaris, Beer, & Barnett, 2019 ; Peiponen & Tsuboi, 1990 ; Yonehara et al., 2004). Simonsen et al (2005) ont trouvé une relation exponentielle entre le R_q d'une surface et « le transfert du moment perpendiculaire de la direction spéculaire » pour estimer la réflectivité. Les auteurs admettent toutefois que leurs résultats ne correspondent pas avec ceux trouvés par des chercheurs précédents.

La réflectivité peut suivre le R_a , mais dépend aussi de l'état moléculaire de la surface. Si l'action de coupe d'usinage ne produit pas un copeau adéquat (notamment en diminuant la vitesse d'avance), un effet de brunissage (*burnishing*) par la pointe de l'outil permet d'obtenir de très faibles R_a , mais la réflexion spéculaire diminue (Li, Yu, Chan, & Lee, 2018). De plus, à une très faible vitesse d'avance dans l'aluminium 6061, les inclusions de Mg_2Si sont repoussées dans la matière plutôt que d'être coupées. Ces inclusions ont un impact sur la réflectivité de l'aluminium après anodisation (Aggerbeck et al., 2014 ; Ma, Zhou, Thompson, Nilsson, et al., 2013 ; Zhu, Zhang, Couper, & Dahle, 2009).

La réflectivité d'une lumière avec une grande longueur d'onde diminue plus vite que celle avec une courte longueur d'onde (Horn & Sjoberg, 1979 ; Kwon & Yoh, 2012 ; Ohno, 2024 ; Peiponen & Tsuboi, 1990 ; Yonehara et al., 2004). Cela est dû au fait qu'une grande longueur d'onde ne peut pénétrer dans des interstices aussi petits (soit des petits R_a) et provoque une réflexion diffuse plutôt que spéculaire.

La différence de réflectivité pour des surfaces avec des états différents est aussi influencée par l'angle d'incidence du rayon lumineux, avec une différence de réflectivité plus importante lorsque l'angle d'incidence tend vers la normale de la surface et une faible différence lorsque l'angle diminue (Lee, 2019 ; Peiponen & Tsuboi, 1990).

Des modèles de définition de la réflectivité en fonction de l'état de surface ont été développés depuis de nombreuses années, comme celui du BRDF (*bidirectional reflectance-distribution function*) qui analyse le ratio de lumière réfléchi et diffuse simultanément dans des angles donnés (Horn & Sjoberg, 1979). Ces modèles ont de nombreuses applications dans l'analyse et la génération d'images, et certains les ont appliquées à l'analyse du Ra (Ohno, 2024 ; Ohno & Kamikawa, 2021). Ces modèles reposent cependant sur des données expérimentales réduites et non généralisées.

1.3 Relation entre état de surface et qualité de l'anodisation

1.3.1 Impact de la microstructure

La microstructure exerce une influence notable sur la réflectivité et sur la variation de celle-ci lors de l'anodisation et l'étape d'attaque à l'acide est celle qui a le plus d'impact sur le résultat final. Les frontières entre les grains se dissolvent à un rythme différent du milieu des grains, ce qui peut créer des rainures limites entre les grains (Figure 1.11). La taille de ces rainures limites est fortement corrélée à la réflectivité après anodisation (Ma, Zhou, Thompson, Nilssoon, et al., 2013 ; Zhu, Couper, & Dahle, 2012 ; Zhu et al., 2009).

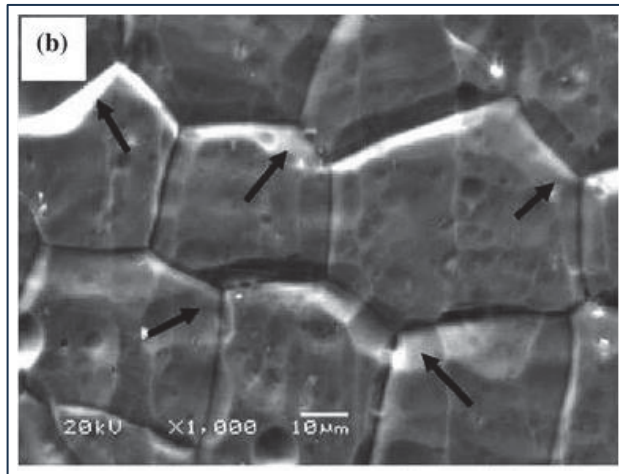


Figure 1.11 Formation de rainures limites entre grains après attaque à l'acide

Tirée de Zhu et al. (2009, p. 5)

L'orientation des grains affecte aussi le rythme de dissolution (Ma, Zhou, Thompson, Nilssoon, et al., 2013 ; Zhu et al., 2012). Des grains plus gros pourraient signifier de plus grandes surfaces en proportion des rainures limites et des dénivelés de surface, donc une plus grande réflectivité (Ma, Zhou, Thompson, Nilssoon, et al., 2013). La Figure 1.12 illustre l'effet des grains sur la couche anodique.

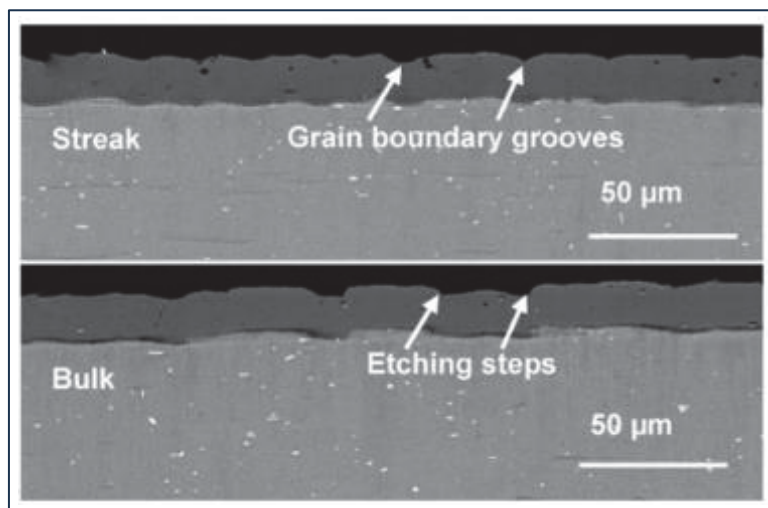


Figure 1.12 Vue de coupe d'une extrusion d'aluminium anodisée avec défauts

Tirée de Ma et al. (2013, p. 3)

Zhu et al (2009) avancent dans une autre étude que la taille des grains n'influe pas directement sur la réflectivité, mais qu'en cas de rainures limites importantes, de petits grains vont accentuer l'espace proportionnellement occupé par ces rainures.

Durant le procédé d'anodisation, l'homogénéité de la couche anodique est reliée à l'homogénéité de la composition chimique de la surface. Alors que l'aluminium pur réagit pour former l'oxyde Al_2O_3 , d'autres éléments d'alliage vont aussi réagir sous l'effet de l'électrolyte et du courant électrique. Dans le cas de l'aluminium 6061, le précipité Mg_2Si est le plus souvent cité comme affectant l'aspect visuel (Aggerbeck et al., 2014 ; Ma et al., 2014 ; Saenz de Miera, Curioni, Skeldon, & Thompson, 2010 ; Scampone & Timelli, 2022 ; Zhu et al., 2009). Ce précipité réagit plus rapidement que l'aluminium et perturbe localement la formation de la couche anodique, surtout à bas voltage (Ma, Zhou, Thompson, Nilsson, et al., 2013). Bien que le comportement exact du Mg_2Si demeure sujet aux débats, Ma et al (2013) proposent que le silicone restant soit principalement responsable de la variation de la réflectivité (Forsyth, 1993). Des formations intermétalliques sont notamment observées à la surface de la couche anodique lorsqu'une concentration importante de Mg_2Si est présente à la surface de la pièce, résultant en une décoloration (Figure 1.13).

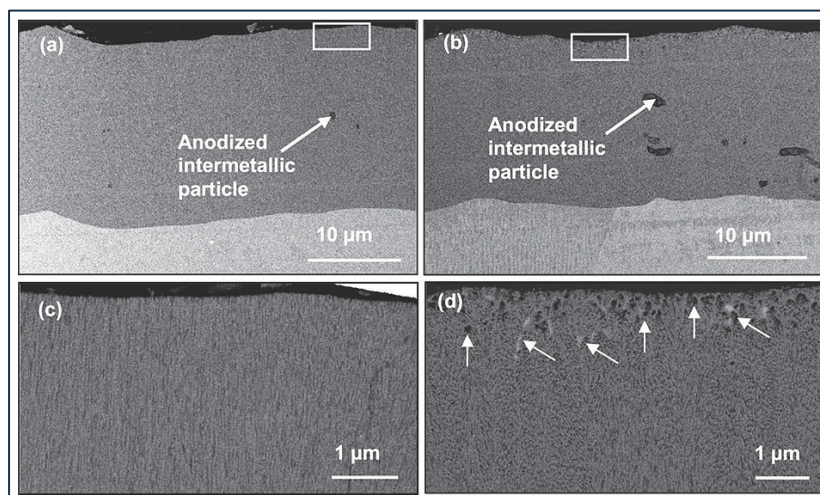


Figure 1.13 Vue de coupe du film anodique : (a) et (c) sont normaux, (b) et (d) sont décolorés

Tirée de Ma et al. (2013, p. 3)

D'autres particules intermétalliques affectent la formation de la couche anodique, soit par une réaction d'oxydation ou à l'inverse par l'absence de réaction. Des cratères, fissures et impuretés créent des variations de réflectivité et affectent aussi les propriétés mécaniques de la couche anodique. Outre le magnésium, les particules contenant du fer ou du cuivre peuvent générer ces problèmes (de Sousa Araujo et al., 2023 ; Saenz de Miera et al., 2010). Il est toutefois peu probable de retrouver ces particules dans l'aluminium étudié dans cette recherche, puisque le 6061 ne contient que très peu de fer et de cuivre.

1.3.2 Impact de la rugosité

Il est généralement accepté qu'une surface plus lisse résultera en une couche anodique plus uniforme (de Sousa Araujo et al., 2023). Puisque la structure anodique se développe en nanopores perpendiculaires à la surface, des changements brusques de l'orientation locale de la surface peuvent forcer le croisement ou l'égueulement des nanopores (Figure 1.3).

Des études ont démontré qu'une rugosité plus basse favorise la croissance de la couche anodique en comparant des surfaces moulées et usinées (Scampone & Giulio, 2024 ; Scampone & Timelli, 2022). Il est cependant aussi mentionné dans ces études que ces surfaces ont des microstructures et compositions chimiques distinctes.

Alors que l'impact de la rugosité préalable reste sujet aux recherches, la rugosité résultante du procédé d'anodisation peut affecter la réflectivité. Par exemple, la dissolution de particules intermétalliques suffisamment grandes peut générer des variations de hauteur et ainsi modifier la réflexion spéculaire. Une particule de Mg_2Si de 200nm complètement dissoute serait suffisante pour que l'œil humain détecte la variation de réflectivité (Ma et al., 2014). Il a d'ailleurs été démontré que la rugosité d'une surface augmente durant le procédé d'anodisation en fonction de la technique d'usinage utilisée (Karakoç & Çakır, 2023).

1.4 Revue critique de la littérature

L'anodisation étant un procédé plutôt ancien, beaucoup de connaissances se sont ajoutées à la littérature scientifique depuis des décennies, surtout au niveau du résultat et de son optimisation. Il reste cependant des sujets ouverts au débat, tels que le mécanisme de formation des nanopores et le comportement des particules intermétalliques. En considérant les très nombreux phénomènes physiques, chimiques et optiques interreliés, il est naturel qu'une compréhension et prédiction globale du procédé soit difficile à atteindre.

Il en ressort que les principaux éléments responsables des défauts visuels de l'anodisation sont la présence du précipité Mg_2Si et la morphologie des grains. Une rugosité très basse tend à augmenter la réflectivité de la surface, mais une relation exponentielle accentue grandement les variations de réflectivité par une faible variation de rugosité. Cette relation n'est d'ailleurs valable que lorsque l'action de coupe demeure constante entre les différentes rugosités. Des relations complexes entre les mesures sont à prévoir.

La complexité du phénomène favorise donc l'analyse isolée des variables dans les recherches, réduisant ainsi le champ d'application des résultats. Cette constatation est flagrante dans les études de la rugosité en fonction des paramètres d'usinage, où l'optimisation d'un procédé très spécifique est extrapolée au procédé général sans validation externe.

En conclusion, bien que le phénomène responsable des défauts visuels de l'anodisation soit bien documenté dans la littérature, il demeure que sa détection par des instruments métrologiques communs en industrie n'est que faiblement explorée. En effet, alors que l'analyse de la microstructure par microscopie ou de la composition chimique de la surface sont valables en contexte de recherche, ces techniques ne sont généralement pas applicables dans un domaine industriel. Un travail de recherche visant à relier ces paramètres à un état de surface facilement mesurable demeure pertinent.

CHAPITRE 2

EXPÉRIMENTATION

2.1 Présentation de l'expérimentation

Dans le but de rechercher des corrélations entre les états de surface et la qualité de l'anodisation, l'expérimentation suivante est proposée.

Des échantillons d'aluminium 6061-T6511 sont usinés avec des outils et paramètres de coupe variés et des mesures de l'état de surface sont prises avant l'anodisation. Les échantillons sont ensuite anodisés pour évaluer la qualité de l'anodisation mesurée à l'aide d'un réflectomètre. Les échantillons sont usinés en double, ce qui permet de conserver un échantillon non anodisé pour effectuer des mesures supplémentaires si requises.

L'expérimentation est divisée en deux sous-groupes : le premier comporte plusieurs outils et paramètres de coupe pour faire varier les états de surface, alors que le second n'a qu'un seul outil avec des paramètres constants, mais une usure sur l'outil est appliquée entre les échantillons.

Le but du premier sous-groupe est d'obtenir un large éventail d'états de surface pour rechercher des corrélations plus généralisées (Srivastava et al., 2021). Le but du second est d'observer les variations fines d'états de surface, à la suite d'une usure d'outil, pour rechercher le point de bascule entre une bonne et mauvaise anodisation (Ashrafi et al., 2013 ; Martins et al., 2021).

Par son expérience industrielle, le partenaire remarque généralement une usure d'outil qu'après des dizaines d'heures d'usinage dans l'aluminium. Cependant, un matériau couramment usiné par le partenaire génère une usure similaire à celle de l'aluminium, mais de façon beaucoup plus rapide : l'Ertalyte TX, un polyéthylène téréphtalate (PET-P) de Mitsubishi Chemical Advanced Materials. En effet, ce plastique userait de façon subtile les

outils en arrondissant légèrement les arêtes de coupe sans créer de fractures. Le partenaire industriel aurait notamment remarqué que des outils ayant préalablement travaillé ce plastique dans des productions précédentes étaient plus susceptibles de générer des défauts d'anodisation s'ils sont réutilisés pour des pièces en aluminium. Des blocs de ce plastique seront donc usinés entre les échantillons du second groupe pour accélérer l'usure de l'outil.

Bien que l'usure par l'Ertalyte TX ne soit pas démontrée académiquement comme similaire à celle de l'aluminium, elle sera présumée suffisante pour générer des variations graduelles de l'état de surface entre les échantillons et sera validée dans l'analyse des résultats. Il n'est d'ailleurs pas possible de générer une usure d'outil par des dizaines d'heures d'usinage dans l'aluminium pour ce travail, considérant des limitations temporelles et budgétaires.

2.2 Échantillons

Les échantillons proviennent de barres d'aluminium 6061-T6511 de 12,7mm x 63,5mm x 3,66m (0,50 x 2,50 x 144 pouces), coupées en longueurs de 76,2mm (3,00 pouces). L'épaisseur de 12,7mm confère à l'échantillon une rigidité qui va limiter les vibrations lors de l'usinage et la taille de 63,5x76,2mm laisse suffisamment d'espace pour les parcours d'usinage (Figure 2.1).

Pour limiter l'effet des variations d'éléments d'alliage sur l'anodisation (Aggerbeck et al., 2014 ; Senel & Hallenstvet, 2014 ; Zhu et al., 2009), tous les échantillons proviennent de barres issues de la même coulée. Un certificat détaillant cette composition fournie par le fabricant est disponible à l'ANNEXE III.

Les échantillons sont usinés en enlevant environ 0,4mm de matière sur une face. Un trou est percé pour retenir les échantillons durant le procédé d'anodisation. Un numéro d'identification est également gravé.

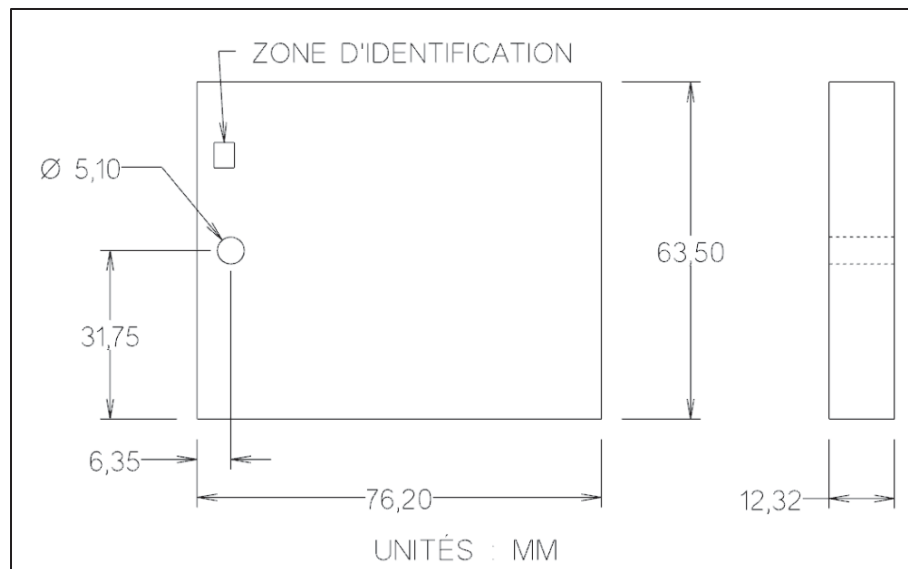


Figure 2.1 Dimensions d'un échantillon

2.3 Choix des outils

Pour générer des états de surface réellement variés, des outils de coupe variés sont utilisés. Ces outils, couramment utilisés par le partenaire industriel, ont des géométries de coupe, matériaux et dimensions différents et sont présentés au Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Outils utilisés







Numéro d'identification	Description	Image
A	Fraise en bout de diamètre 1 pouce, 3 plaquettes en carbure, épaulement à 90°, rayon de coin de 0,015 pouce	
	Porte-plaquettes : Seco R217.69-01.00-12RE-12-3AN Plaquettes : Seco XOEX 120404FR-E06 H15	
B	Fraise à surfacer de diamètre 2 pouces, 4 plaquettes en carbure, épaulement à 45°, rayon de coin de 0,015 pouce	
	Porte-plaquettes : Sumitomo WGXM42000R Plaquettes : Sumitomo SEET13T3AGFR-L DL1000	
C	Fraise à surfacer de diamètre 2 pouces, 7 plaquettes en carbure, épaulement à 90°, rayon de coin de 0,008 pouce	
	Porte-plaquettes : Sumitomo WEZ22000R07 Plaquettes : Sumitomo AOET11T302PEFR-S DL2000	

Tableau 2.1 Outils utilisés (suite)

Numéro d'identification	Description	Image
D	Fraise à surfacer de diamètre 3 pouces, 5 plaquettes en carbure et une plaquette en diamant (PCD), épaulement à 90°, rayon de coin de 0,016 pouce	
	Porte-plaquettes : Sandvik RA590-076R25A-11M Plaquettes : Sandvik R590-1105H-PR5-NL CD10 et R590-110504H-NL H10	
E	Fraise en bout de diamètre 0,750 pouce, 3 flutes en carbure solide, pas de rayon de coin	
	Outil : Niagara N61554	
F	Fraise en bout de diamètre 6mm, 3 flutes en carbure solide, cou dégagé, pas de rayon de coin	
	Outil : Imco 61347	

2.4 Parcours d'usinage des outils

Le partenaire industriel a remarqué dans le passé que les parcours d'outil se chevauchant sont plus susceptibles de générer des défauts visuels après anodisation. Par conséquent, les

échantillons sont usinés avec des zones où l'outil ne passe qu'une fois et des zones où l'outil chevauche un précédent parcours.

2.4.1 Parcours de l'outil A

L'outil A exécute un usinage en bout avec des zones de passages uniques et d'autres de passages chevauchés (Figure 2.2 et Figure 2.3). Il s'agit du même parcours pour l'usinage des échantillons que pour l'usinage d'usure dans les blocs d'Ertalyte TX, à l'exception que l'usinage d'usure exécute 87 passes axiales de 0,38mm de profondeur.

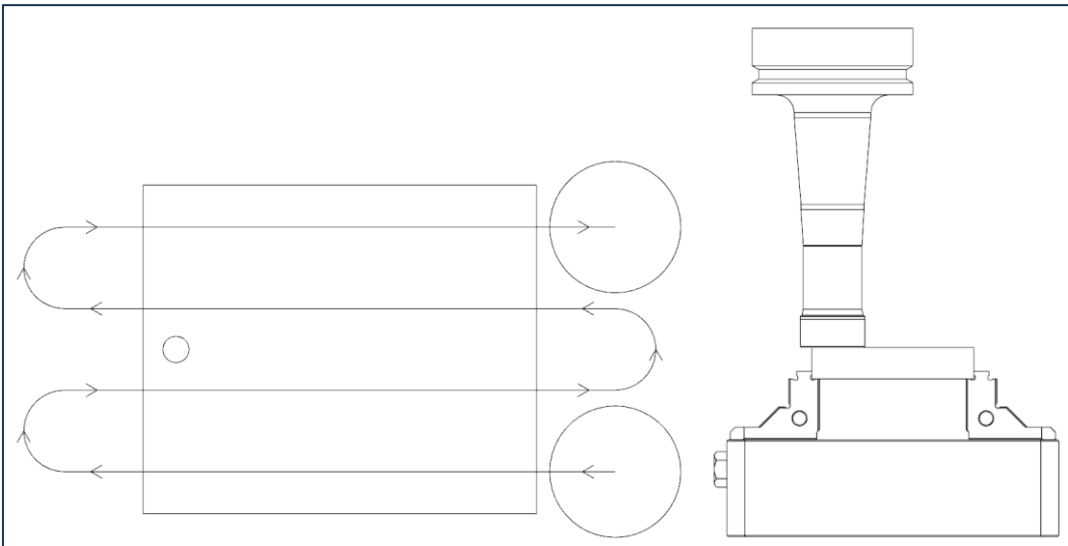


Figure 2.2 Parcours de l'outil A

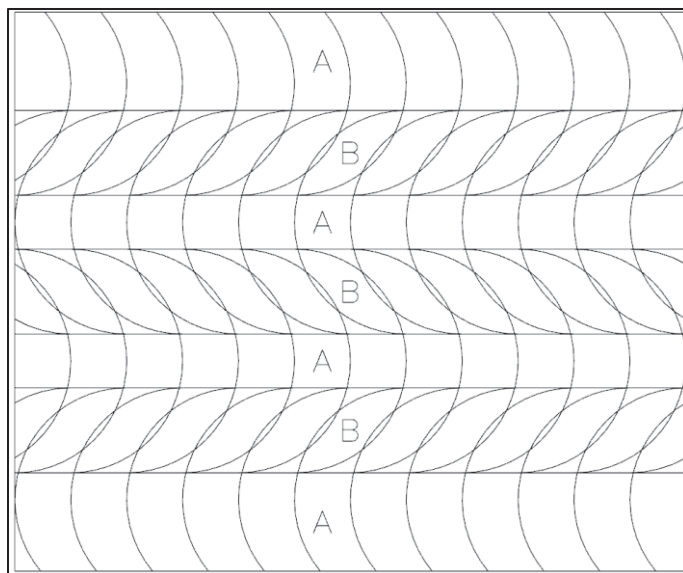


Figure 2.3 Zones de passage unique (A) et de chevauchement (B) pour l'outil A

2.4.2 Parcours des outils B, C et D

Ces outils exécutent un usinage en bout avec une zone de chevauchement au milieu de l'échantillon (Figure 2.4 et Figure 2.5).

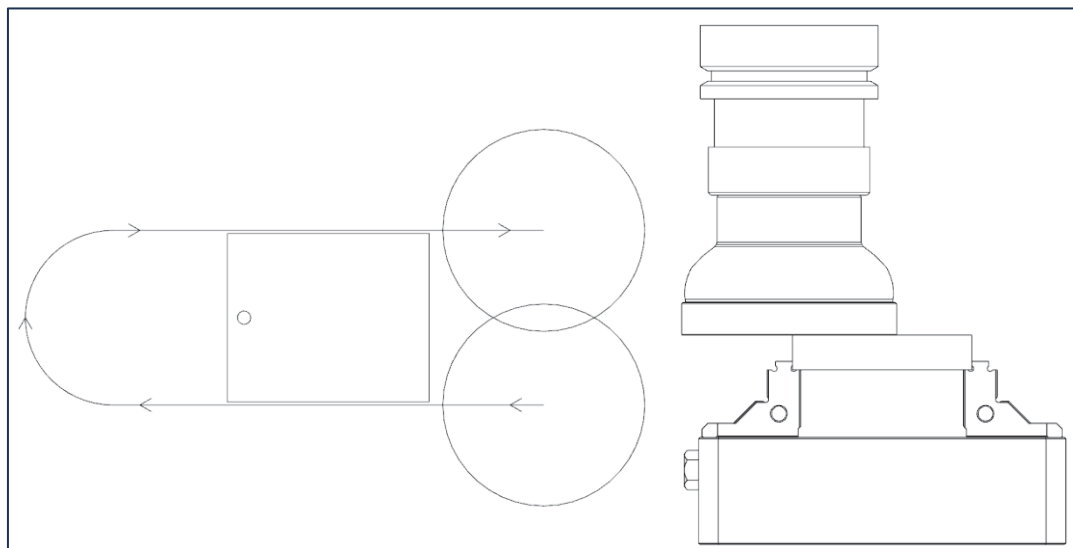


Figure 2.4 Parcours des outils B, C et D

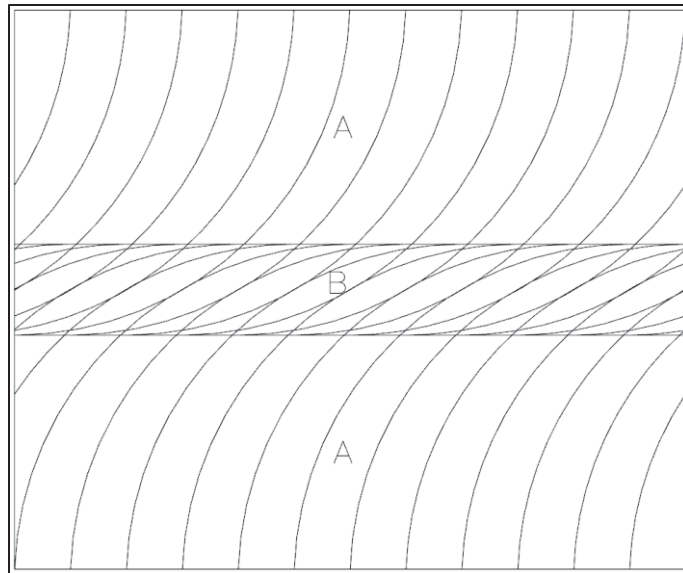


Figure 2.5 Zones de passage unique (A) et de chevauchement (B) pour les outils B, C et D

2.4.3 Parcours de l'outil E

L'outil E exécute un usinage de périphérie avec une zone de chevauchement au milieu de l'échantillon (Figure 2.6 et Figure 2.7).

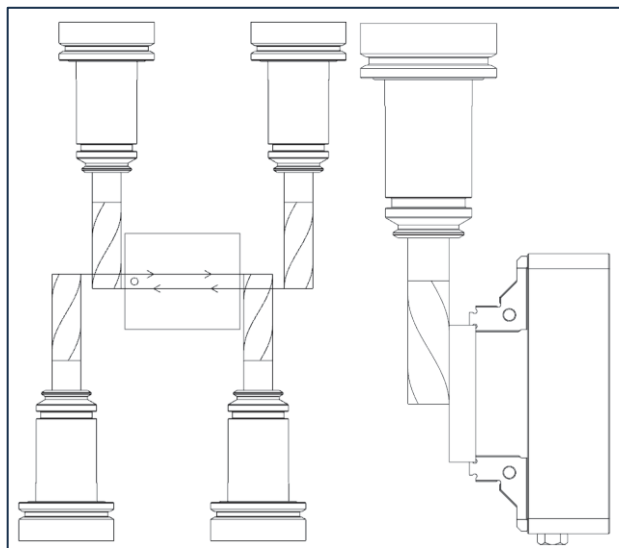


Figure 2.6 Parcours de l'outil E

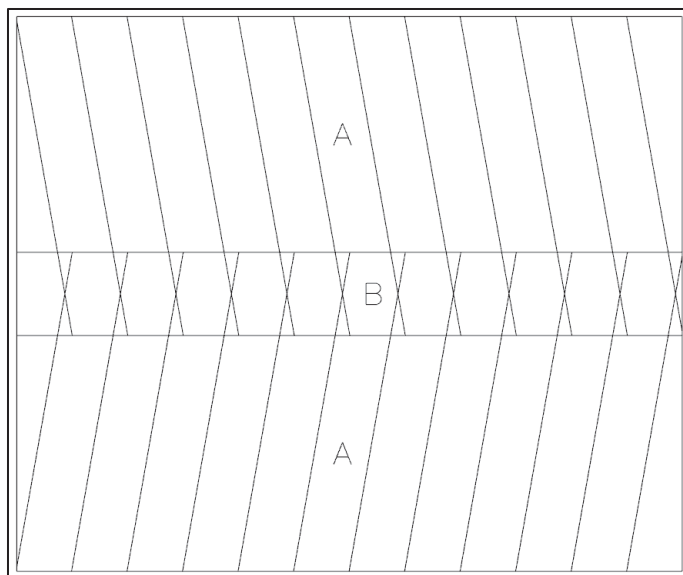


Figure 2.7 Zones de passage unique (A) et de chevauchement (B) pour l'outil E

2.4.4 Parcours de l'outil F

L'outil F exécute un usinage de périphérie avec des zones de chevauchement sur l'ensemble de l'échantillon (Figure 2.8 et Figure 2.9). Cela est dû au fait que sa longueur de coupe est insuffisante pour usiner l'échantillon en un seul passage périphérique.

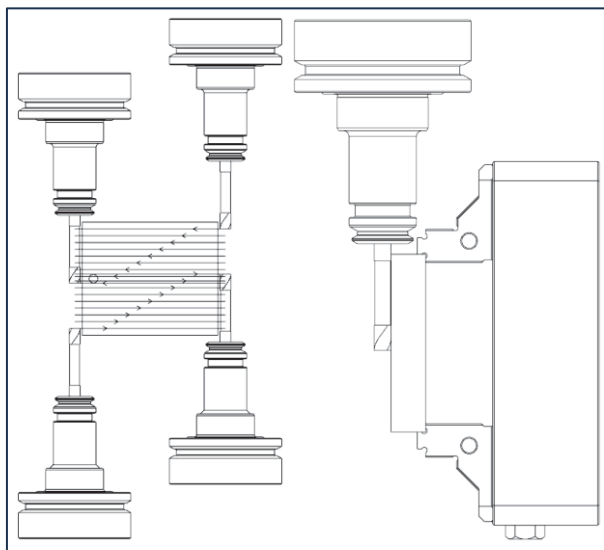


Figure 2.8 Parcours de l'outil F

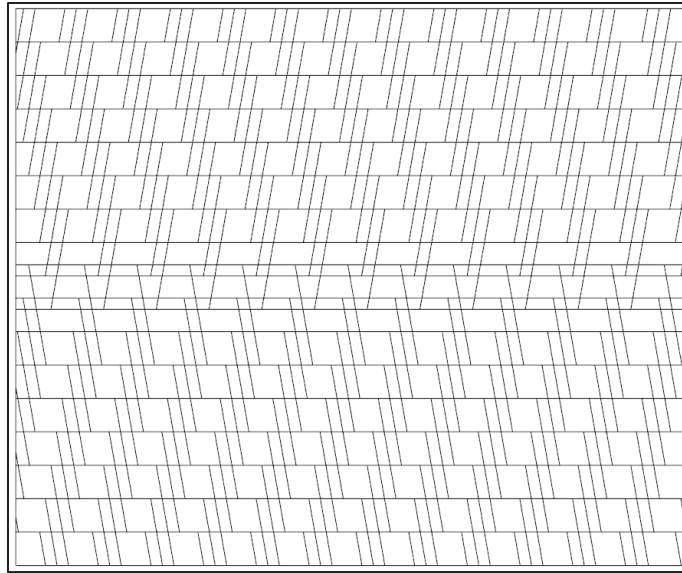


Figure 2.9 Zones de chevauchement pour l'outil F

2.5 Paramètres de coupe du premier groupe d'échantillons

Parmi les paramètres d'usinage les plus influents sur l'état de surface se trouvent la vitesse d'avance et la vitesse de coupe (Benardos & Vosniakos, 2003 ; Srivastava et al., 2021). Un plan d'expérience matriciel de 3 par 4 fait varier ces paramètres pour obtenir 12 couples de paramètres pour chacun des 6 outils.

En utilisant les paramètres de coupe standards du partenaire industriel, des variations de -15%, 0%, +15%, +30% (codage -1, 0, 1, 2) sont appliquées sur la vitesse d'avance et des variations de -15%, 0%, +15% (codage -1, 0, 1) sont appliquées sur la vitesse de coupe. Le Tableau 2.2 présente le plan d'expérience codé et le Tableau 2.3 les paramètres calculés pour l'outil A. Les tableaux des paramètres pour l'ensemble des outils sont disponibles à l'ANNEXE II. L'essai 5 correspond aux paramètres usuels utilisés par le partenaire industriel. Dans le Tableau 2.3, l'avance en millimètres par tour et la vitesse en mètres par minute sont les paramètres qui ont été variés, tandis que l'avance en millimètre par minute et la vitesse en tours par minute sont les paramètres équivalents qui ont été programmés dans la machine.

Tableau 2.2 Codage des
paramètres de coupe

Essai	Avance	Vitesse
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	1
4	0	-1
5	0	0
6	0	1
7	1	-1
8	1	0
9	1	1
10	2	-1
11	2	0
12	2	1

Tableau 2.3 Paramètres de coupe de l'outil A

Essai	Avance (mm/tour)	Vitesse (mètre/minute)	Avance (mm/minute)	Vitesse (tour/minute)
1	0,216	1017	2753	12750
2	0,216	1197	3238	15000
3	0,216	1376	3724	17250
4	0,254	1017	3238	12750
5	0,254	1197	3810	15000
6	0,254	1376	4382	17250
7	0,292	1017	3724	12750
8	0,292	1197	4382	15000
9	0,292	1376	5039	17250
10	0,330	1017	4261	12750
11	0,330	1197	4953	15000
12	0,330	1376	5696	17250

2.6 Paramètres de coupe du second groupe d'échantillons

Comme le but du second groupe est d'observer une variation fine des états de surface par l'usure d'un outil, les paramètres de coupe demeurent constants entre les essais. L'outil utilisé pour ces essais est le A, en utilisant les paramètres usuels du partenaire industriel pour cet outil, présentés au Tableau 2.4. Ces mêmes paramètres sont appliqués pour l'usinage du plastique simulant l'usure.

Tableau 2.4 Paramètres de coupe pour le second groupe d'échantillons

Essai	Avance (mm/tour)	Vitesse (mètre/minute)	Avance (mm/minute)	Vitesse (tour/minute)
Tous	0,254	1197	3810	15000

2.7 Montage et machine

La machine utilisée pour usiner les échantillons est une DMG Mori DMU 40eVo, un centre d'usinage 5 axes appartenant au partenaire industriel. Ce centre d'usinage étant couramment utilisé dans la fabrication de pièces en aluminium anodisées, les essais réalisés seront donc représentatifs d'un contexte de production industrielle. Un étau autocentrant retient les échantillons, permettant ainsi l'usinage de bout et de périphérie sur un même montage (Figure 2.10). Le serrage est effectué avec une clé dynamométrique ajustée à 33,9 N*m, assurant une répétition stable entre les échantillons.

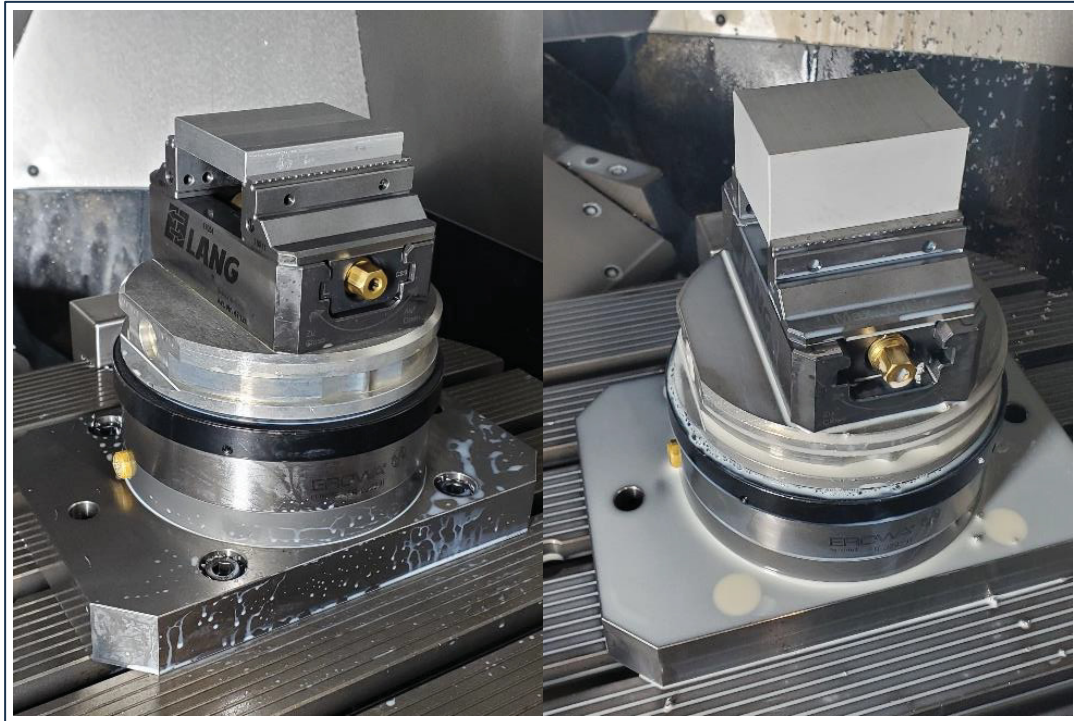


Figure 2.10 Montage de l'échantillon et du bloc de plastique dans la machine

2.8 Mesure de l'état de surface

La mesure de l'état de surface des échantillons est effectuée avec un rugosimètre de marque Mitutoyo modèle SJ-410, qui permet de récolter plus d'une vingtaine de types de rugosité linéaire par mesure. Les paramètres utilisés sont cinq longueurs de base de 0,80mm pour une longueur d'évaluation de 4mm, tel que recommandé par la norme ASME B46.1 (ASME, 2019). Les mesures sont prises à deux emplacements : dans la zone de chevauchement des passages d'outil et dans la zone de passage unique. À chaque emplacement, les mesures sont prises dans deux directions perpendiculaires pour avoir une bonne représentation de la surface et sont répétées trois fois avec un espacement de 1mm entre chaque pour considérer la variation de la surface (Figure 2.11).

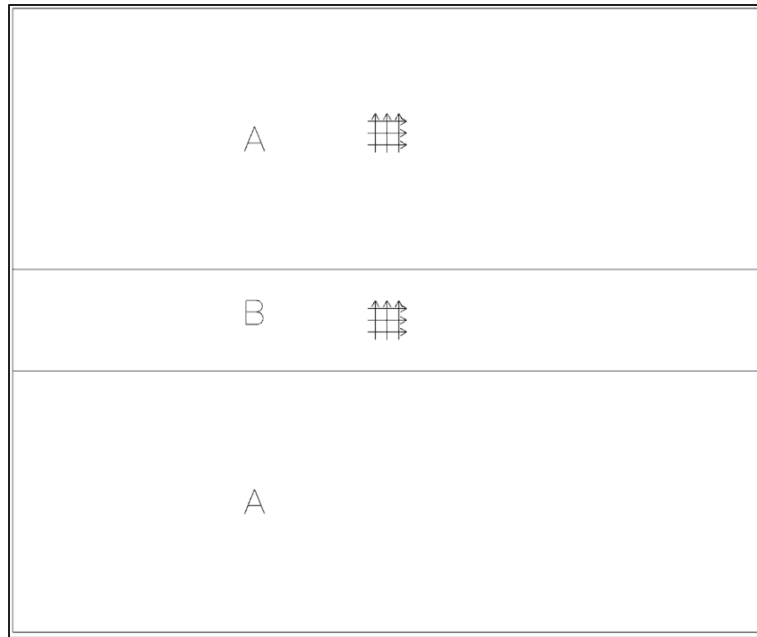


Figure 2.11 Mesures de rugosité prises dans les zones de passage unique (A) et de chevauchement (B)

Pour s'assurer que les mesures de rugosité sont prises aux mêmes emplacements pour l'ensemble des échantillons, des gabarits de positionnement imprimés 3D sont utilisés. En plus de fournir une répétabilité de positionnement entre les échantillons, l'utilisation de gabarit permet aussi de cibler les emplacements des mesures de rugosité pour les reproduire dans les mesures de réflectivité. L'utilisation de ces gabarits est présentée à la Figure 2.12 et à la Figure 2.13.

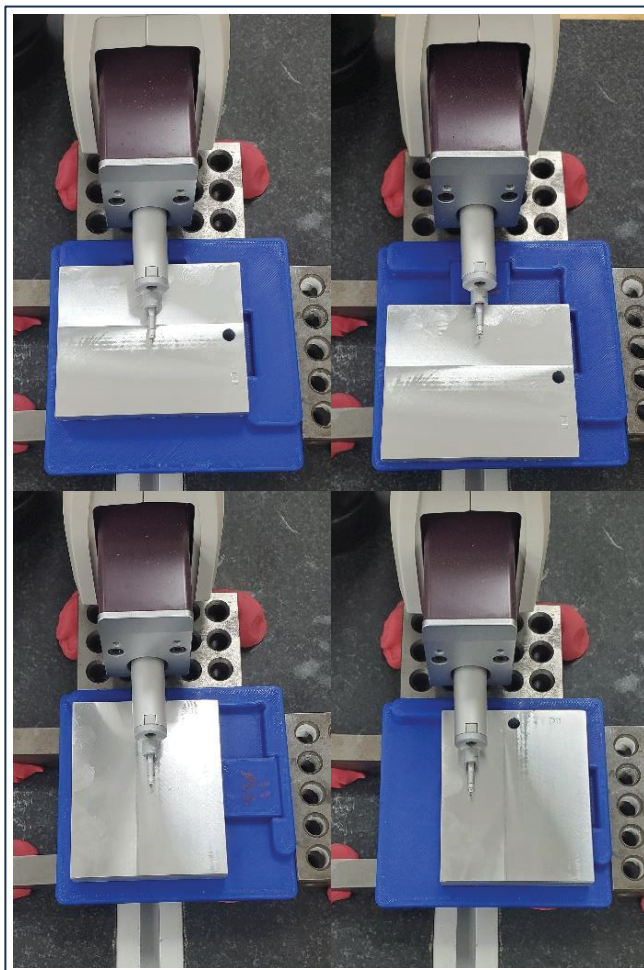


Figure 2.12 Gabarits pour la mesure de la rugosité

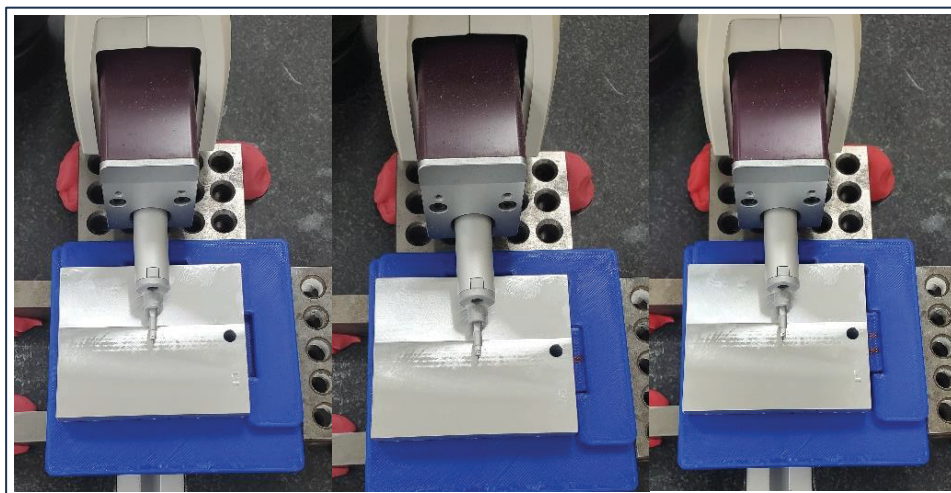


Figure 2.13 Espaceurs de 1mm pour les gabarits de mesure de la rugosité

2.9 Mesure de la réflectivité

Pour tester l'hypothèse que le procédé d'anodisation exerce une influence sur l'aspect visuel des surfaces, la réflectivité des échantillons est mesurée avant et après l'anodisation.

La réflectivité est mesurée avec un réflectomètre de marque DeFelsko modèle PosiTector GLS, qui permet les mesures de réflectivité aux angles de 20°, 60° et 85° en étant conforme à la norme ISO 7668. Les mesures sont prises aux mêmes emplacements que pour la rugosité, soit dans la zone de chevauchement des passages d'outil et dans la zone de passage unique (Figure 2.14). À chaque emplacement, la mesure est prise dans deux directions perpendiculaires et dans les deux directions opposées. Puisque la surface de mesure couvre celle de la rugosité avec ses espacements de 1mm, les mesures de réflectivité ne sont pas espacées, mais plutôt prises trois fois au même endroit pour limiter le risque d'une mauvaise lecture. Il serait d'ailleurs difficile d'espacer les lectures, considérant la surface de mesure en relation avec les zones de chevauchement de parcours d'outil.

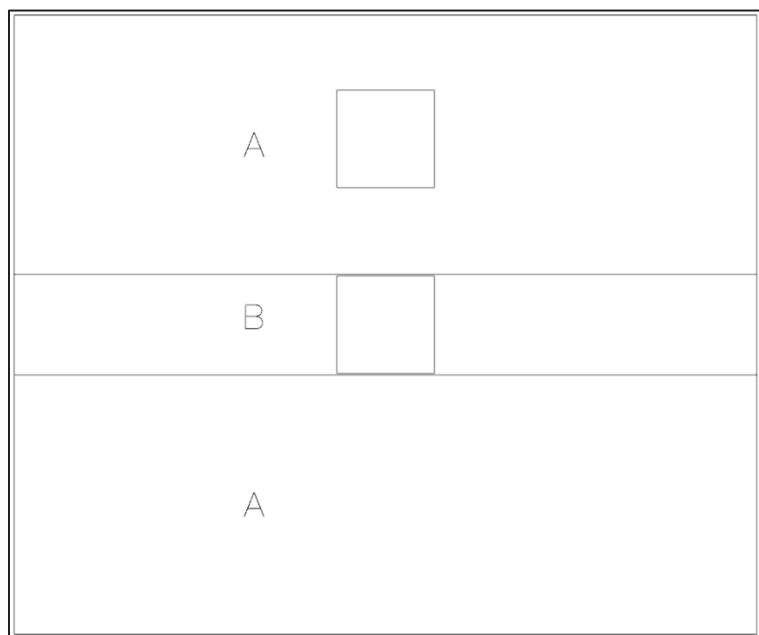


Figure 2.14 Mesures de réflectivité prises dans les zones de passage unique (A) et de chevauchement (B)

Pour les mêmes raisons que lors des mesures de la rugosité, des gabarits imprimés 3D sont utilisés pour le positionnement des échantillons. Ces gabarits sont conçus de sorte que les emplacements des mesures soient les mêmes que ceux de la rugosité (Figure 2.15 et Figure 2.16).



Figure 2.15 Gabarits pour la mesure de la réflectivité



Figure 2.16 Mesures de la réflectivité dans des directions opposées sur un même gabarit

2.10 Anodisation

L'anodisation des échantillons est effectuée par l'entreprise Pro Star Canada Inc. qui se spécialise dans la finition des produits en aluminium anodisé. Le procédé d'anodisation suit les spécifications MIL-A-8625 type II (United States Department of Defense, 2020) avec une coloration rouge, ce qui représente le traitement le plus couramment utilisé par le partenaire industriel.

Les consignes suivantes ont été transmises : traiter l'ensemble des échantillons en un seul et même lot et dans les mêmes bassins; utiliser le trou percé comme support et contact électrique; placer tous les échantillons avec la même orientation sur les supports. Ces consignes assurent que les échantillons auront une couche anodique similaire en réduisant le risque de variation des paramètres d'anodisation (de Sousa Araujo et al., 2023 ; Diggle et al., 1969 ; C. A. Grubbs, 2007 ; Korzekwa, 2023 ; Wong et al., 2017).

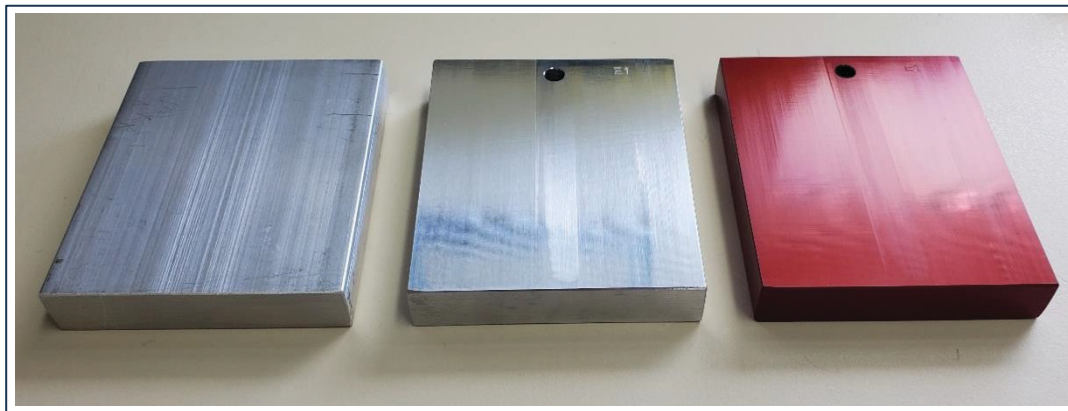


Figure 2.17 Échantillons brut, usiné et anodisé

2.11 Estimation de la précision et répétabilité des instruments de mesure

Considérant que la durée de prise des mesures sur les échantillons s'étale sur quelques jours, il est pertinent de vérifier que les instruments conservent leur précision et répétabilité. Par conséquent, des mesures sont prises sur des étalons au début et à la fin de chaque journée de

mesure. L'analyse de ces mesures de référence permettra de conscrire les données expérimentales à une plage d'erreur.

Pour les mesures de rugosité, l'étalon de référence Mitutoyo 178-602 (Figure 2.18) est mesuré trois fois avec un espacement de 1mm entre chaque mesure.



Figure 2.18 Étalon de référence pour les mesures de rugosité

Pour les mesures de réflectivité, l'étalon de référence en verre noir poli fourni avec le réflectomètre est mesuré trois fois au même emplacement, son emplacement étant fixé par sa conception (Figure 2.19).



Figure 2.19 Étalon de référence pour les mesures de réflectivité

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

3.1 Erreur des instruments de mesure

L'erreur réelle des instruments de mesure peut être estimée par les mesures prises sur des étalons durant l'expérimentation (voir section 2.11).

3.1.1 Erreur du rugosimètre

La fiche de spécifications techniques ne spécifie pas la précision de l'instrument puisqu'il peut être utilisé pour de nombreuses mesures, mais énonce une résolution de $0,001\mu\text{m}$ (Mitutoyo, 2015). L'erreur de répétabilité présentée au Tableau 3.1 est donc estimée par la variance des mesures de l'étalon. Les calculs sont disponibles à l'ANNEXE IV.

Tableau 3.1 Erreurs du rugosimètre

	Valeur de l'étalon	Erreur absolue	Erreur relative
Ra	$3,05\mu\text{m}$	$\pm 0,06\mu\text{m}$ à 95%	$\pm 1,97\%$ à 95%
Rz	$9,9\mu\text{m}$	$\pm 0,24\mu\text{m}$ à 95%	$\pm 2,46\%$ à 95%

Il est possible de valider ces erreurs en vérifiant si les lectures de l'étalon sont comprises dans la plage d'erreur. Pour être valide, 5% ou moins des lectures doivent sortir de la plage, soit 0,9 lecture dans le cas présent puisque 18 lectures sont prises. Tel qu'illustré à la Figure 3.1, l'ensemble des lectures du Ra sont comprises dans la plage, tandis que la Figure 3.2 indique qu'une lecture du Rz dépasse l'erreur maximale calculée. Puisque le nombre de lectures hors plage est d'une pour une limite de 0,9, l'auteur considère ce résultat comme acceptable.

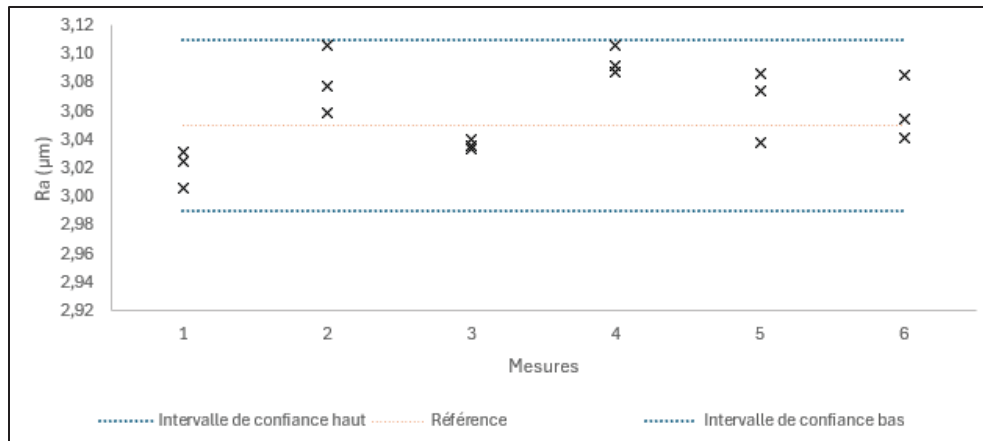


Figure 3.1 Mesures du Ra de l'étalon et plage d'erreur

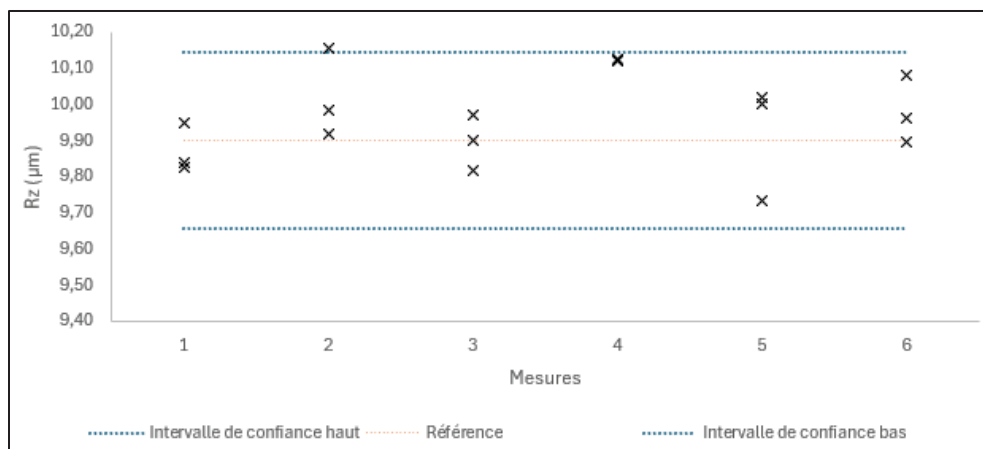


Figure 3.2 Mesures du Rz de l'étalon et plage d'erreur

3.1.2 Erreur du réflectomètre

La fiche technique du réflectomètre spécifie une erreur de reproductibilité de $\pm 0,5\text{GU}$ (*Gloss Units*) et $\pm 0,5\%$ et une résolution de 0,1GU et 1GU pour des lectures de 100GU et moins et de plus de 100GU respectivement (DeFelsko, 2022). La certitude de l'erreur n'étant pas spécifiée par le fabricant, elle est donc considérée comme un écart-type et sera doublée pour une certitude à 95%. Pour valider cette erreur, l'erreur expérimentale est calculée à partir des mesures de l'étalon, ces calculs sont disponibles à l'ANNEXE IV. Les résultats sont présentés au Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Erreurs du réflectomètre

		Fiche technique		Mesures	
	Valeur de l'étalon	Erreur absolue	Erreur relative	Erreur absolue	Erreur relative
20°	89,2GU	$\pm 1,0\text{GU}$ à 95%	$\pm 1,0\%$ à 95%	$\pm 0,46\text{GU}$ à 95%	$\pm 0,52\%$ à 95%
60°	92,8GU	$\pm 1,0\text{GU}$ à 95%	$\pm 1,0\%$ à 95%	$\pm 0,26\text{GU}$ à 95%	$\pm 0,28\%$ à 95%
85°	99,0GU	$\pm 1,0\text{GU}$ à 95%	$\pm 1,0\%$ à 95%	$\pm 0,19\text{GU}$ à 95%	$\pm 0,19\%$ à 95%

Les erreurs de la fiche technique seront donc utilisées, puisqu'elles sont plus grandes que celles mesurées. Pour vérifier si elles sont valables à 95%, moins de 5% des lectures doivent être comprises dans la plage, soit 1,5 lecture dans le cas présent puisque 30 lectures sont prises. Tel que démontré à la Figure 3.3, Figure 3.4 et Figure 3.5, toutes les mesures sont comprises dans les plages d'erreur, l'erreur du réflectomètre peut donc être considérée comme valable.

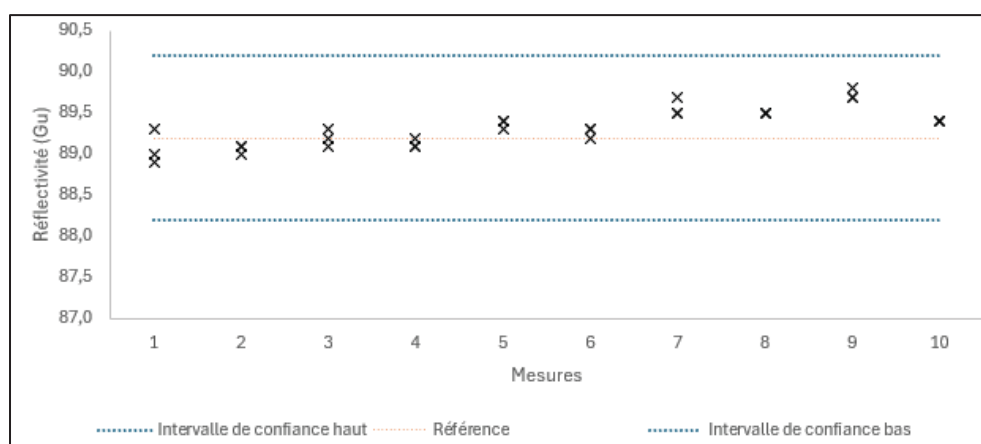


Figure 3.3 Mesures à 20° de l'étalon et plage d'erreur

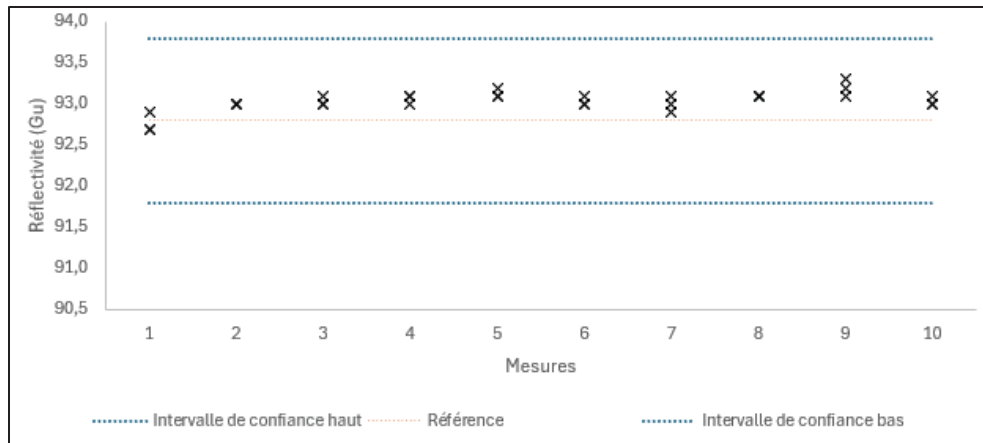


Figure 3.4 Mesures à 60° de l'étalon et plage d'erreur

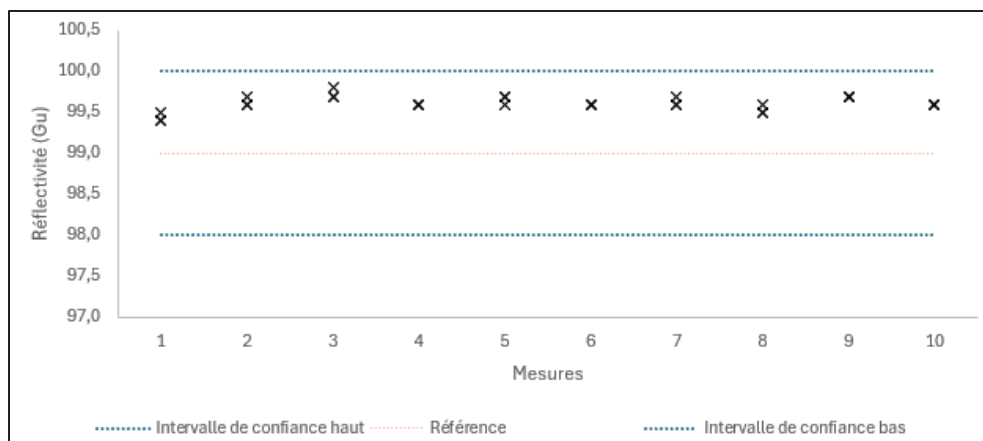


Figure 3.5 Mesures à 85° de l'étalon et plage d'erreur

3.2 Validation du plan d'expérience

3.2.1 Effet des paramètres de coupe sur l'état de surface

La première partie du plan d'expérience proposé repose sur l'hypothèse que la variation des paramètres de coupe se traduit par une variation de l'état de surface (Srivastava et al., 2021). Pour simplifier la vérification de cette hypothèse, la rugosité R_a est utilisée comme métrique de l'état de surface. Il sera d'ailleurs démontré à la Figure 4.9 de la section 4.2 que les différentes mesures de l'état de surface sont corrélées.

Puisque les outils ont des paramètres de coupe et géométries variées, les valeurs normalisées des paramètres telles que présentées dans le Tableau 2.2 sont utilisées. Les valeurs du Ra sont aussi normalisées par outil, où 0 représente la plus basse valeur de Ra pour cet outil et 1 la plus haute. La lecture de rugosité est prise dans la zone de passage unique de l'outil dans la direction de l'usinage. Un nuage de points est tracé en appliquant une échelle de couleur aux valeurs de Ra (Figure 3.6).

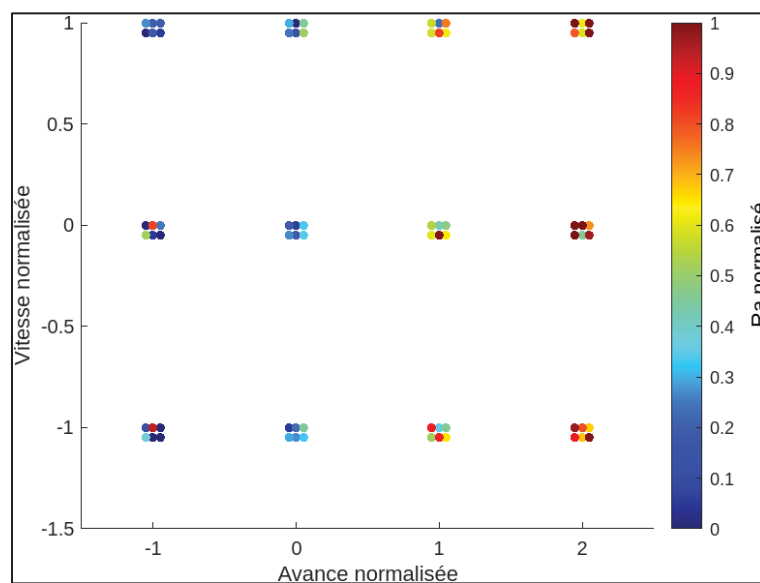


Figure 3.6 Ra selon les paramètres de coupe

Il est possible de constater que plus l'avance d'usinage est élevée, plus le Ra augmente, tandis que la vitesse de coupe ne semble toutefois pas l'influencer. Puisque des rugosités différentes ont été produites, le plan d'expérience ne peut pas être rejeté.

3.2.2 Effet de l'usure d'outil sur l'état de surface

La seconde partie du plan d'expérience émet l'hypothèse qu'une usure d'outil aura pour effet de dégrader l'état de surface (Ashrafi et al., 2013 ; Martins et al., 2021). Pour vérifier cette hypothèse, la rugosité Ra normalisée est utilisée, mesurée dans la zone de passage unique de l'outil dans la direction de l'usinage, puis placée en ordre d'usinage des échantillons (Figure 3.7).

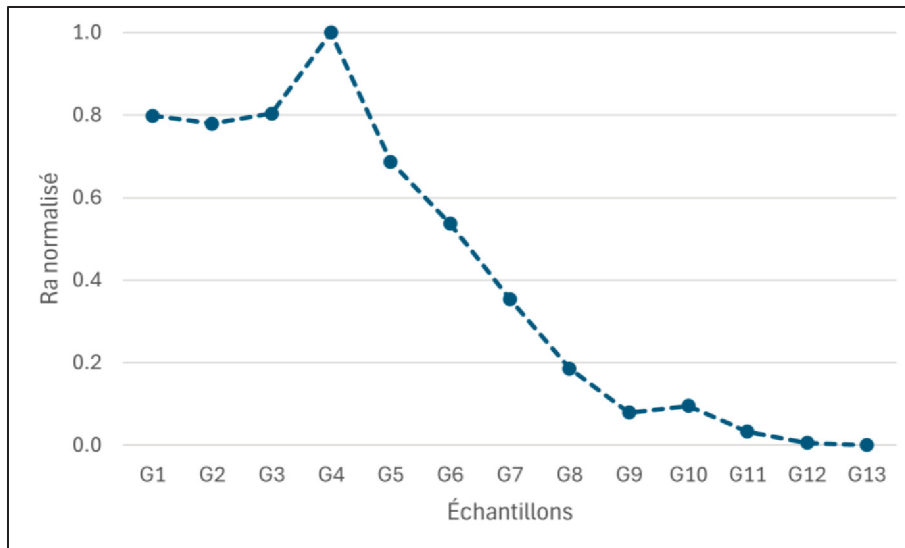


Figure 3.7 Ra selon l'usure d'outil

Une variation de la rugosité est présente, mais celle-ci est opposée à l'hypothèse initiale : la rugosité diminue avec l'usure de l'outil. Bien que l'hypothèse doive être rejetée, le plan d'expérience peut être conservé puisque l'objectif de varier l'état de surface est atteint. Ce phénomène peu documenté dans la littérature scientifique est cependant parfois observé par le partenaire industriel, où un outil neuf peut produire des rugosités élevées avant de se stabiliser en production.

3.3 Effet de l'anodisation sur la réflectivité

Pour tester adéquatement l'hypothèse que l'état de surface affecte l'anodisation, il est pertinent de vérifier l'effet qu'a l'anodisation en relation avec la technique de mesure, soit la réflectivité. Pour ce faire, la réflectivité avant et après anodisation est comparée sur l'ensemble des échantillons. L'utilisation des gabarits de mesure présentés à la section 2.9 assure que les lectures de réflectivité sont effectuées aux mêmes emplacements. Des corrélations linéaires apparaissent d'emblée, tel que présenté sur les figures suivantes, où la majorité des données se retrouvent dans un intervalle de prédiction de 95%.

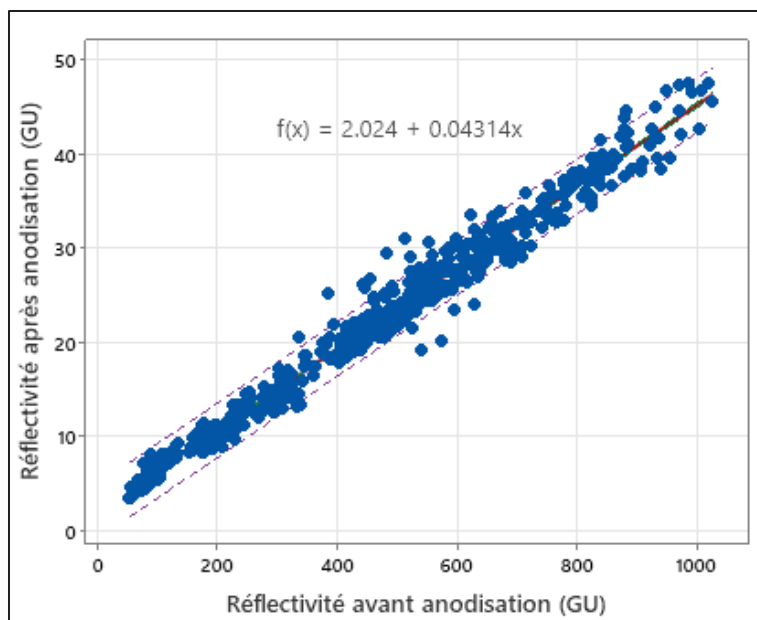


Figure 3.8 Réflectivité à 20° avant et après anodisation

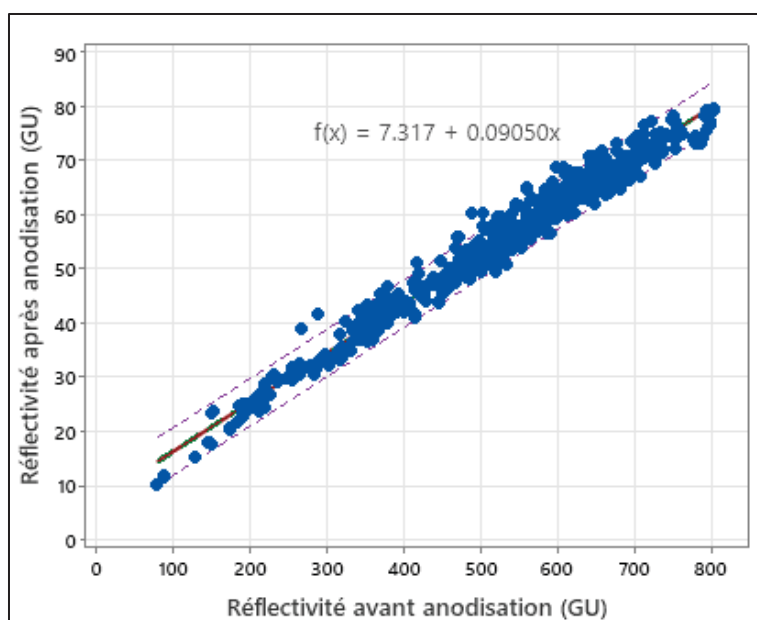


Figure 3.9 Réflectivité à 60° avant et après anodisation

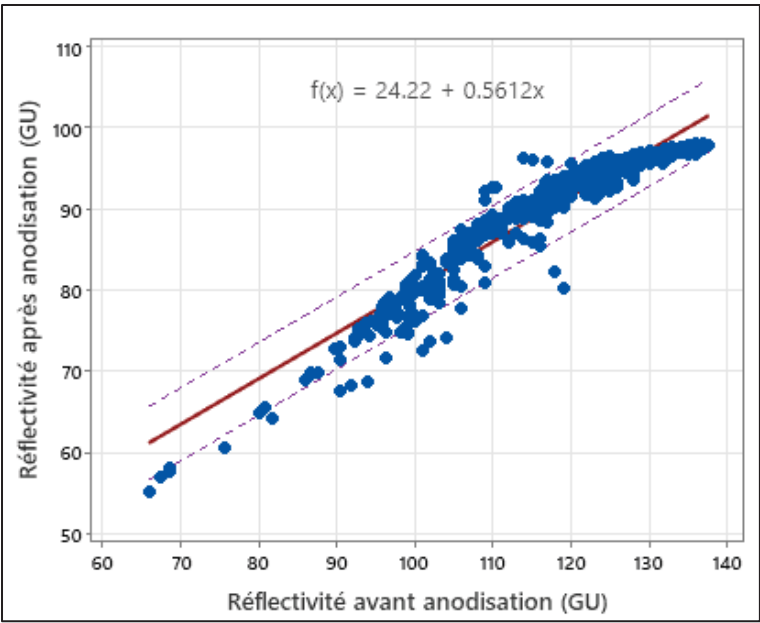


Figure 3.10 Réflectivité à 85° avant et après anodisation

Le Tableau 3.3 présente les équations de régression des réflectivités avant et après anodisation ainsi que leur paramètre R^2 ajusté.

Tableau 3.3 Équations de la réflectivité après anodisation en fonction de la réflectivité avant anodisation

Angle de réflectivité	Équation	R^2 ajusté
20°	$f(x) = 2,024 + 0,0431x$	98,24%
60°	$f(x) = 7,317 + 0,0905x$	97,94%
85°	$f(x) = 24,22 + 0,5612x$	90,91%

3.4 Effet de l'état de surface sur la réflectivité

En considérant qu'il a été démontré que l'anodisation affecte de façon linéaire la réflectivité, la recherche de relation entre l'état de surface et la réflectivité portera plutôt sur la réflectivité avant anodisation. Si un modèle entre état de surface et réflectivité avant anodisation est

trouvé, il sera facile de le combiner avec celui de la réflectivité avant et après anodisation et ainsi couvrir un plus grand domaine d'application.

3.4.1 Analyse préliminaire des données

3.4.1.1 Test de normalité

Les paramètres mesurés sont vérifiés pour la présence de distributions suivant une loi normale, ce qui pourrait signifier une non-corrélation avec les résultats. C'est le cas du paramètre Rsk qui a une distribution très proche d'une normale centrée à 0, tel que présenté à la Figure 3.11. Ce paramètre ne sera donc pas considéré comme pertinent dans la recherche de modèles.

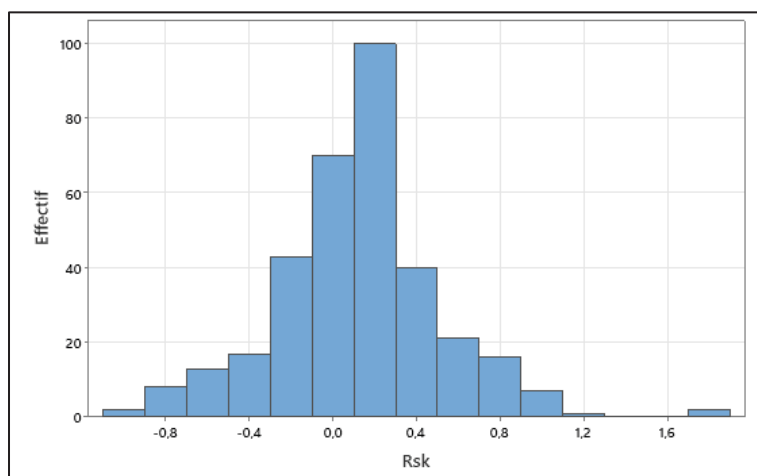


Figure 3.11 Distribution des mesures du paramètre Rsk

Les paramètres de sortie sont aussi vérifiés et ne suivent pas de distribution normale, comme le démontre la Figure 3.12.

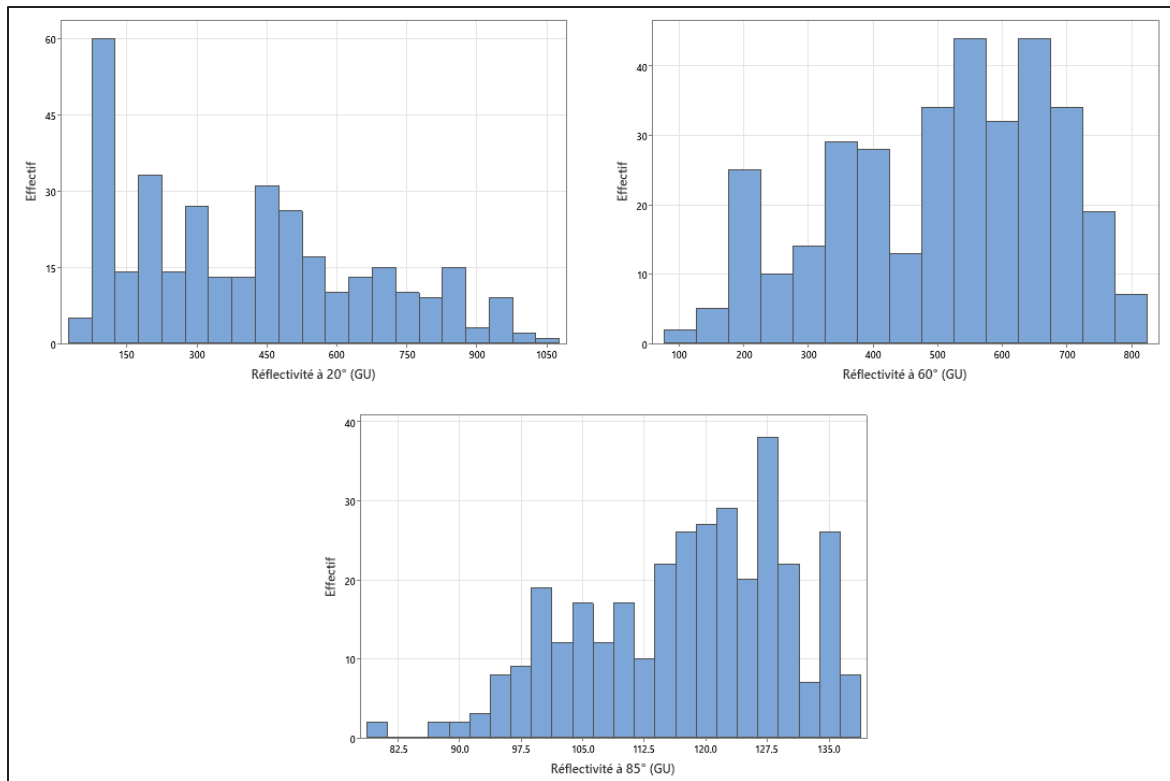


Figure 3.12 Distributions des mesures de la réflectivité à 20°, 60° et 85°

3.4.1.2 Test de données aberrantes

Le test de Grubbs (F. E. Grubbs, 1969) est utilisé avec un seuil de signification de 0,05 pour exclure les données aberrantes qui pourraient fausser la construction des modèles. La Figure 3.13 illustre la numérotation des mesures sur chaque échantillon : perpendiculaire au déplacement d'outil dans la zone de chevauchement (1) et de passage unique (2) et parallèle au déplacement d'outil dans la zone de chevauchement (3) et de passage unique (4). Les mesures écartées des échantillons par paramètre sont présentées au Tableau 3.4. Par exemple, la mesure E12-3 signifie que la mesure sur le 12^e échantillon de l'outil E à l'emplacement 3 est considérée comme aberrante.

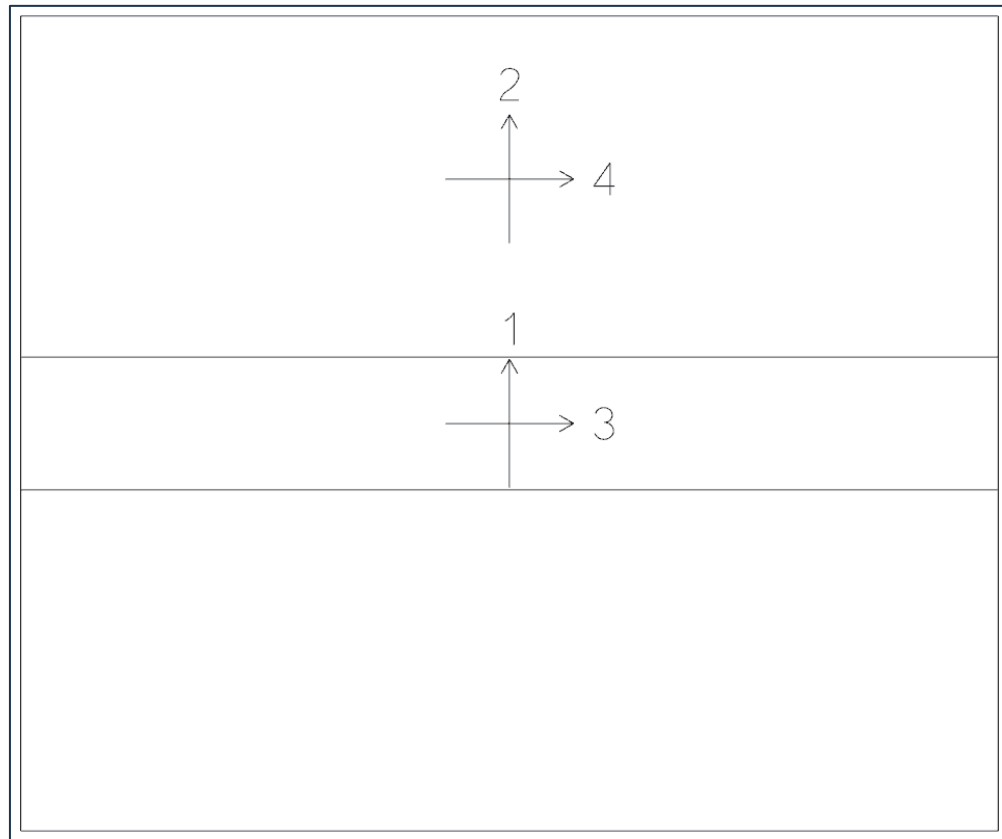


Figure 3.13 Numérotation des mesures

Tableau 3.4 Données aberrantes

Paramètre	Échantillon - emplacement
Ra	E12-3
Rq	E11-3, E12-3
Rp	E7-3, E9-3, E11-3, E12-3
Rku	E1-2, E4-2, F4-2, F5-1, F5-2, F6-1, F7-1, F7-2, F8-1, F8-2, F9-1, F9-2, F10-1, F10-2, F11-1, F11-2, F12-1, F12-2
Rc	E7-3, E11-3, E12-3
RDq	F1-1, F1-2, F2-2, F3-2
Rmr	B3-2, C1-1, C1-2, C1-3, C2-2, C2-4, C3-2, C3-4, C4-2, C4-4, C5-2, C6-1, C6-2, C7-1, C7-2, C7-3, C8-2, C9-2, C10-2, C11-2, C12-2, G1-2, G7-2, G8-2, G9-2, G10-2, G11-2, G12-2, G13-2
Rmr(c)1	G4-3, G4-4, G5-4, G6-1, G7-4
Rmr(c)2	G3-4, G4-1, G4-3, G4-4, G5-4, G7-4
Rdc	B1-4, B10-4, B11-4, B12-4, E2-3, E3-3, E4-3, E5-3, E6-3, E7-3, E7-4, E8-3, E8-4, E9-3, E9-4, E10-3, E10-4, E11-3, E11-4, E12-3, E12-4
Rpk	B11-4, E4-3, E5-3, E6-3, E7-3, E8-3, E9-3, E10-3, E10-4, E11-3, E11-4, E12-3, E12-4, F9-2
Rvk	G2-4, G3-4, G4-4, G5-4, G6-4, G7-4
Mr1	E9-3
Mr2	G2-4, G3-4, G4-4, G5-4, G7-4
A1	B1-4, B2-4, B5-4, B7-4, B8-4, B9-4, B10-4, B11-4, B12-4, E1-3, E1-4, E2-3, E2-4, E3-3, E4-3, E5-3, E5-4, E6-3, E6-4, E7-3, E7-4, E8-3, E8-4, E9-3, E9-4, E10-3, E10-4, E11-3, E11-4, E12-3, E12-4, F8-2, F9-1, F9-2, F11-1, F11-4
A2	B2-3, G2-4, G3-3, G3-4, G4-1, G4-4, G5-4, G6-4, G7-4
Réfectivité à 85°	F1-1, F1-2

3.4.2 Transformation des données pour une analyse linéaire

Pour simplifier la recherche de corrélations, chaque paramètre d'entrée et de sortie est dédoublé en des variantes non linéaires communes : puissance au carré, inverse, racine carrée, logarithme à base 10 et exponentielle. Cela permettra de calculer uniquement des régressions linéaires en considérant comme nouveaux paramètres les paramètres transformés, plutôt que de calculer de nombreuses combinaisons de régressions non linéaires. Le Tableau 3.5 présente en exemple quelques mesures du Ra transformées.

Tableau 3.5 Exemple de transformation des données

Échantillon	Ra (μm)	Ra^2	$1/Ra$	\sqrt{Ra}	$\log_{10} Ra$	e^{Ra}
A1-1	0,211	0,0445	4,74	0,459	-0,676	1,23
A2-1	0,218	0,0475	4,59	0,467	-0,662	1,24
A3-1	0,173	0,0299	5,78	0,416	-0,762	1,19
A4-1	0,187	0,0350	5,35	0,432	-0,728	1,21

Certaines transformations de données ne sont toutefois pas réalisables, notamment si l'exponentielle d'un grand nombre génère un nombre trop gros pour être traité. Lorsqu'une proportion importante de la transformation d'une donnée est jugée invalide, cette transformation ne sera pas considérée. Le Tableau 3.6 énumère les transformations conservées pour les paramètres d'état de surface et le Tableau 3.7 celles des réflectivités.

Tableau 3.6 Transformations des paramètres d'état
de surface

[illegible]

Tableau 3.7 Transformations des paramètres de réflectivité

Paramètre	x	x^2	$1/x$	\sqrt{x}	$\log_{10} x$	e^x
20°	√	√	√	√	√	
60°	√	√	√	√	√	
85°	√	√	√	√	√	

3.4.3 Recherche de corrélations

Considérant le grand nombre de paramètres d'entrée et de sortie, il serait fastidieux de tester manuellement toutes les combinaisons possibles de corrélation. En effet, après la transformation des données, 135 paramètres d'état de surface en entrée doivent être mis en relation avec 15 paramètres de réflectivité en sortie. Un algorithme écrit dans le langage Python est alors utilisé pour automatiser la recherche. Les fonctionnalités principales de cet algorithme sont les suivantes : tri préliminaire des paramètres, sélection itérative des paramètres, génération des combinaisons de paramètres, régression linéaire sur les paramètres et tests statistiques sur les régressions. La Figure 3.14 illustre le fonctionnement de l'algorithme sous forme d'organigramme et le code est disponible à l'ANNEXE V.

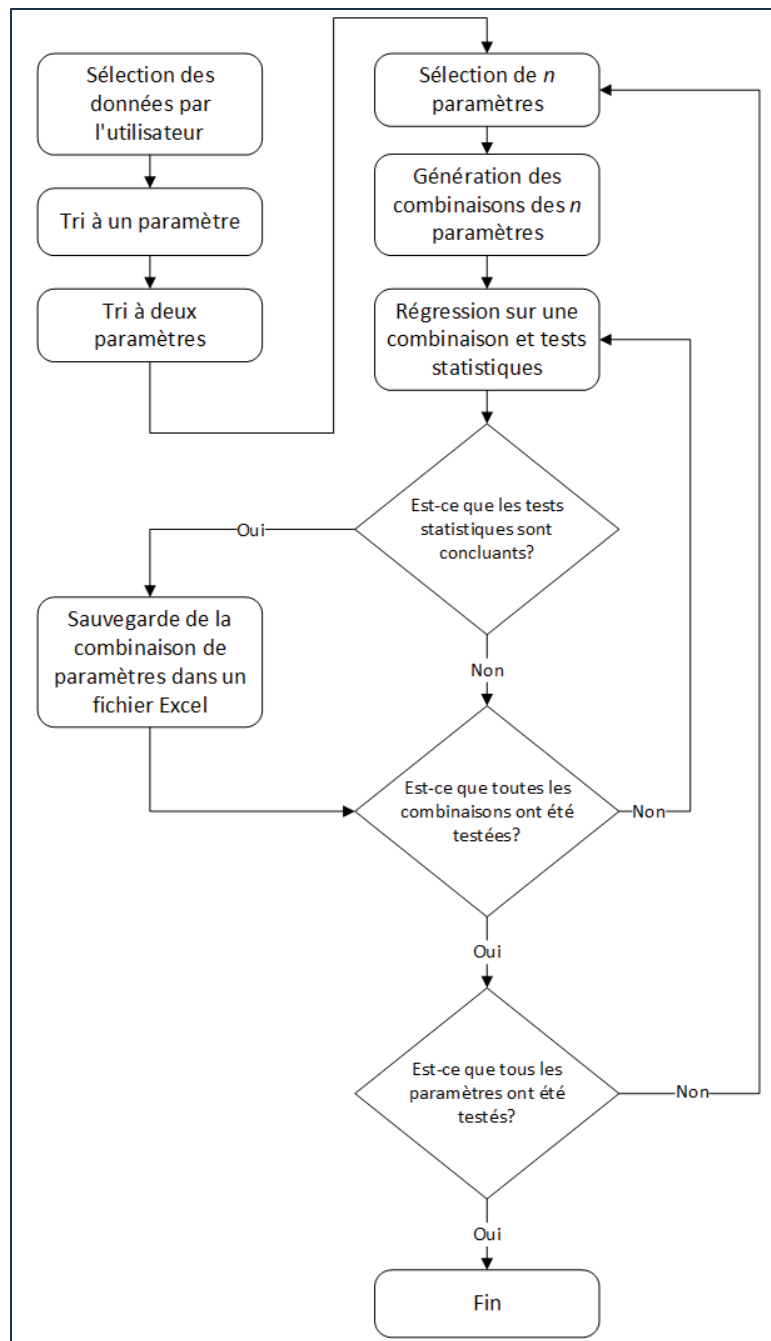


Figure 3.14 Organigramme de l'algorithme

La logique et la structure de l'algorithme ont été développées par l'auteur et les intelligences artificielles ChatGPT (OpenAI, 2025), Claude Sonnet 3.7 (Anthropic, 2025) et GitHub Copilot (GitHub, 2025) ont aidé à la rédaction, la syntaxe et l'optimisation du code. Github Copilot fut utilisée comme assistant de rédaction en effectuant de l'autocomplétion des lignes

de code et l'écriture de certaines fonctions à partir du contexte et des commentaires présents dans le code, ainsi qu'à la correction de la syntaxe et erreurs. ChatGPT et Claude Sonnet furent utilisées pour générer des ébauches de fonctions plus complexes comme la gestion des sélections de paramètres et pour optimiser des fonctions telle une boucle récursive pour générer des combinaisons de paramètres.

3.4.3.1 Tri préliminaire des paramètres

Deux tris sont effectués au début de l'algorithme pour éliminer les paramètres d'entrée qui ont une faible probabilité d'expliquer le paramètre de sortie dans le but de réduire le temps d'exécution total.

Le premier tri consiste à faire deux régressions linéaires sur le paramètre de sortie avec chacun des paramètres d'entrée, soit une régression avec et sans terme constant. Pour être conservé, un paramètre d'entrée doit avoir un R^2 ajusté d'au moins 10% sur une des deux régressions, sinon il est éliminé.

Le second tri est similaire au premier, mais en considérant les paramètres en paires. Par une boucle itérative, chaque paramètre d'entrée est combiné à chacun des autres paramètres et deux régressions linéaires sont calculées, soit une avec et sans terme constant. Le paramètre est aussi testé individuellement comme au premier tri, mais avec un seuil plus élevé. Pour être conservé, un paramètre d'entrée doit avoir un R^2 ajusté d'au moins 30% sur une des régressions, sinon il est éliminé. Les équations modèles des régressions sont les suivantes, où y est le paramètre de sortie, x_0 le paramètre d'entrée testé, x_i les autres paramètres d'entrée, c le terme constant et a_0 et a_i les coefficients calculés par la régression.

$$\begin{aligned}
 y &= a_0 x_0 \\
 y &= c + a_0 x_0 \\
 y &= a_0 x_0 + a_i x_i \\
 y &= c + a_0 x_0 + a_i x_i
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

3.4.3.2 Sélection itérative des paramètres

Une fois les paramètres triés, une boucle itérative sélectionne un nombre donné de paramètres qui est déterminé au début de l'exécution de l'algorithme par l'utilisateur. Chaque sélection de paramètres sera utilisée pour calculer les régressions, de telle sorte que tous les ensembles de paramètres sont testés.

3.4.3.3 Génération des combinaisons de paramètres

Chaque ensemble de paramètres est étendu en générant de nouveaux paramètres qui sont les produits des paramètres originaux. Par exemple, soit un ensemble de trois paramètres :

$$\{x_0 ; x_1 ; x_2\} \quad (3.2)$$

L'ensemble étendu avec les combinaisons est :

$$\{x_0 ; x_1 ; x_2 ; x_0x_1 ; x_0x_2 ; x_1x_2 ; x_0x_1x_2\} \quad (3.3)$$

3.4.3.4 Régression linéaire sur les paramètres

Il est maintenant possible de calculer une régression linéaire sur les paramètres étendus, puisque toutes les transformations non linéaires ont déjà été effectuées et donc chaque paramètre peut être considéré comme une variable linéaire. Une boucle itérative calcule une régression linéaire par la méthode des moindres carrés sur tous les agencements possibles des paramètres, testant ainsi l'entièreté des possibilités. Une régression avec le terme constant et une sans le terme constant sont calculées. Par exemple, en considérant l'ensemble étendu suivant :

$$\{x_0 ; x_1 ; x_2 ; x_0x_1 ; x_0x_2 ; x_1x_2 ; x_0x_1x_2\} \quad (3.4)$$

Les sous-ensembles suivants seront utilisés pour calculer les régressions :

$$\begin{aligned}
& \{x_0\} \\
& \{x_0 ; x_1\} \\
& \{x_0 ; x_1 ; x_2\} \\
& \{x_0 ; x_1 ; x_2 ; x_0x_1\} \\
& \{[\dots]\} \\
& \{x_0 ; x_1 ; x_2 ; x_0x_1 ; x_0x_2 ; x_1x_2 ; x_0x_1x_2\} \\
& \{x_0 ; x_2\} \\
& \{x_0 ; x_2 ; x_0x_1\} \\
& \{[\dots]\} \\
& \{x_0x_1x_2\}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

3.4.3.5 Tests statistiques sur les régressions

Sur chaque régression calculée, une série de tests statistiques est effectuée pour valider le modèle. Si tous les tests sont réussis, les paramètres du modèle sont sauvegardés dans un fichier Excel. Le Tableau 3.8 présente les tests effectués, leur signification et leur valeur seuil utilisée.

Tableau 3.8 Tests statistiques effectués sur les régressions

Test	Signification	Seuil
Corrélation (R^2)	La sortie du modèle doit être corrélée au paramètre de sortie réel	$R^2 > 0,85$
Signification globale du modèle (test F)	Les paramètres d'entrée doivent pouvoir expliquer le paramètre de sortie	$F < 0,05$
Valeur P des coefficients	Chaque coefficient doit être pertinent dans le modèle	$P < 0,05$ (pour tous les coefficients)
Normalité des résidus (Anderson & Darling, 1952)	Les résidus doivent suivre une distribution normale centrée à zéro	$AD > 0,05$
Autocorrélation des résidus (Durbin & Watson, 1951)	Les résidus doivent être indépendants	$1,5 < DW < 2,5$
Valeurs aberrantes des résidus (score Z)	La proportion de résidus avec des valeurs aberrantes ne doit pas être trop élevée	$Z < 0,05$
Hétéroscédasticité (Breusch & Pagan, 1980)	La variance des résidus ne doit pas être corrélée aux paramètres d'entrée	$BP > 0,05$
Multicolinéarité (VIF)	Les paramètres d'entrée ne doivent pas être colinéaires	$VIF < 10$ (pour tous les paramètres d'entrée)

3.4.3.6 Analyse des modèles de régression trouvés par l'algorithme

Les modèles sauvegardés dans un fichier Excel par l'algorithme sont reproduits manuellement à l'aide du logiciel d'analyse statistique Minitab pour être analysés davantage. Cela permet notamment de valider les tests statistiques calculés par l'algorithme par l'analyse graphique des résidus.

3.4.4 Résultat de la recherche de corrélations

Bien que l'algorithme ait trouvé de nombreux modèles de régression significatifs pour différents paramètres de sortie, aucun des modèles ne peut être considéré comme statistiquement valable en prédiction.

En effet, tous les modèles sauvegardés présentent une pente descendante comme tendance dans le graphique des valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées. En considérant par exemple le modèle suivant sauvegardé par l'algorithme comme pertinent :

$$\text{Réflectivité } 60^\circ = \left(\frac{-4,742}{A1} + \frac{73,69 * Rpk}{A1} - \frac{142,41 * \log(Rv) * Rpk}{A1} \right)^2 \quad (3.6)$$

Tous les indicateurs statistiques testés par l'algorithme respectent les seuils établis, mais l'analyse des valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées présente une tendance en pente descendante, tel qu'illustré à la Figure 3.15.

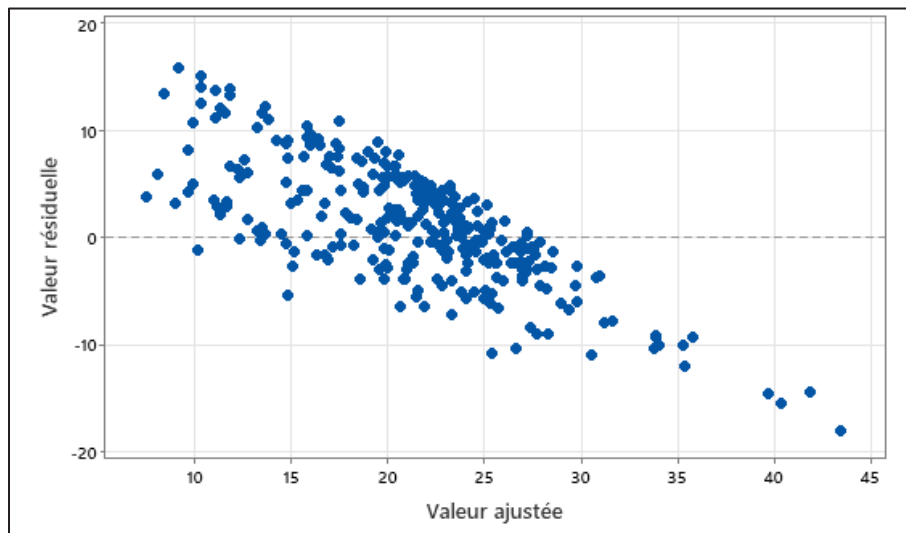


Figure 3.15 Valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées

Les modèles trouvés ont aussi de faibles performances en prédiction, comme le démontre la Figure 3.16 les valeurs prédites par le modèle présenté précédemment.

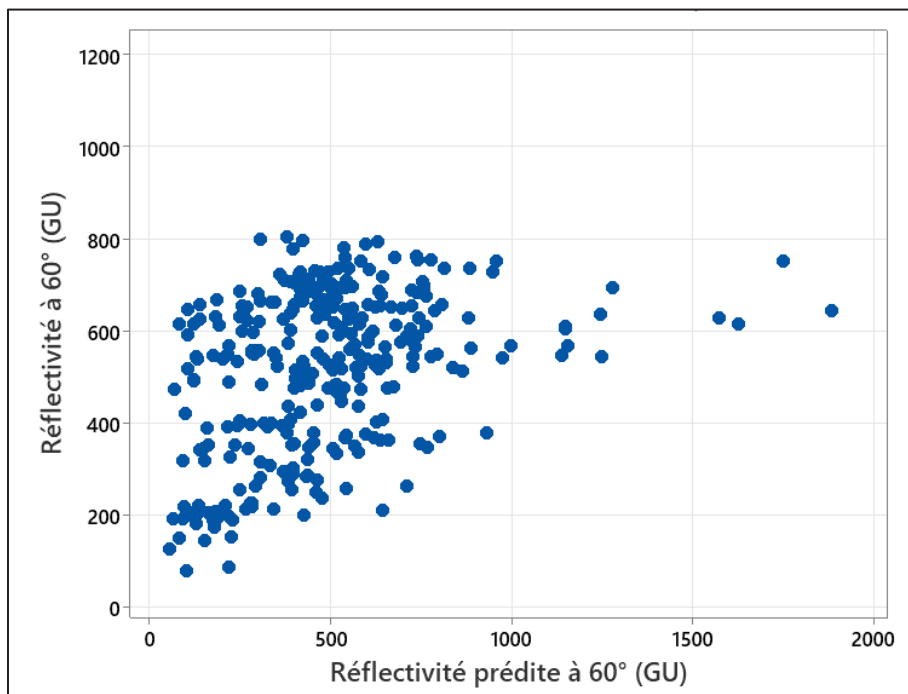


Figure 3.16 Valeurs prédites en fonction des valeurs mesurées

CHAPITRE 4

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

4.1 Effet de l'anodisation sur la réflectivité

En observant les graphes et fonctions de la réflectivité avant et après anodisation, il apparaît que la réflectivité diminue beaucoup plus avec un petit angle d'incidence (20°) qu'avec un grand angle (85°). Cette variation est évidente lorsque représentée sur un graphique en trois dimensions en reliant les points par une surface libre (Figure 4.1).

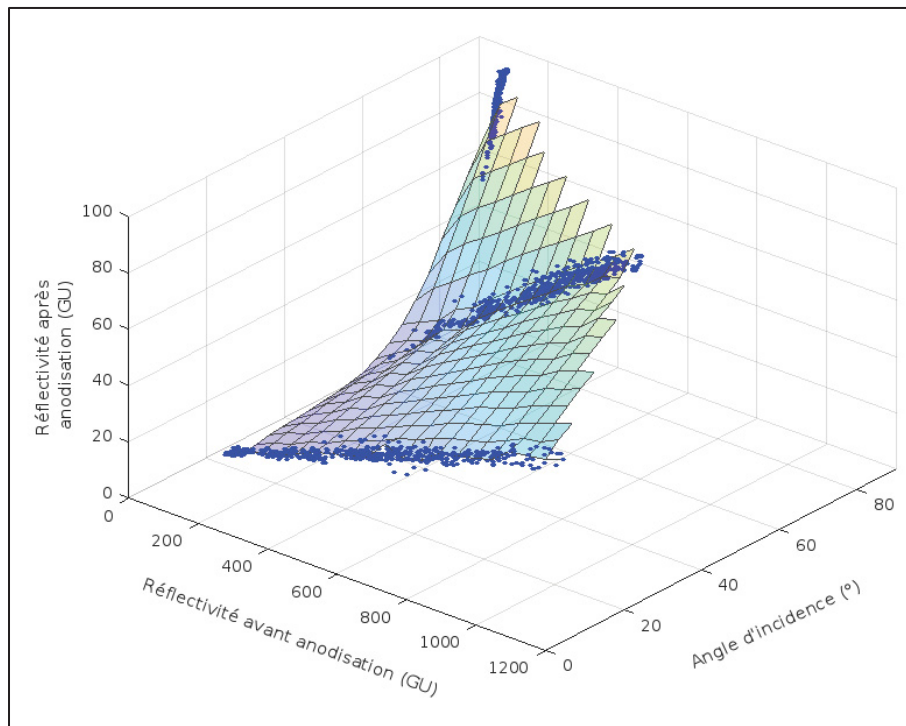


Figure 4.1 Réflectivités avant et après anodisation selon l'angle d'incidence reliées par une surface libre

La surface libre montre une tendance courbe plutôt que plane. Le modèle trigonométrique de base suivant est appliqué aux données, où $f(x, \theta)$ est la réflectivité prévue après anodisation, x est la réflectivité avant anodisation et θ l'angle d'incidence :

$$f(x, \theta) = \alpha \tan(\varphi + \beta \theta) + C \quad (4.1)$$

L'équation suivante est obtenue :

$$f(x, \theta) = 0,01038 * x * \tan(71,03 + 0,2136 * \theta) + 4,059 \quad (4.2)$$

La Figure 4.2 superpose les points mesurés à la surface du modèle avec une échelle de couleur représentant l'écart entre l'expérience et le modèle. Une forte adéquation est observable.

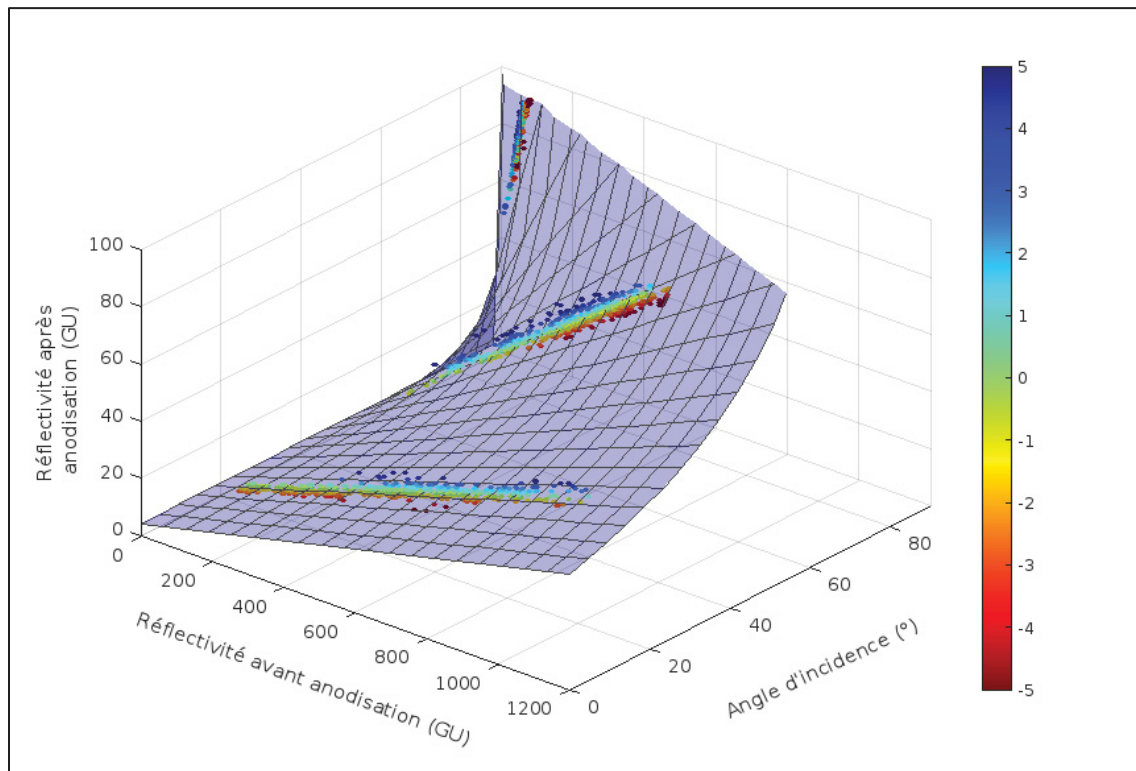


Figure 4.2 Réflectivités avant et après anodisation selon l'angle et écart du modèle

Pour valider la stabilité et fiabilité du modèle, les données sont transformées en fonction des erreurs potentielles de lecture du réflectomètre présentées à la section 3.1.2. Pour ce faire, les marges d'erreur sont appliquées aux mesures pour minimiser et maximiser l'écart au modèle. La Figure 4.3 présente la répartition des erreurs. Les données non transformées suivent une

courbe normale centrée de moyenne nulle, les données avec erreurs minimisées suivent aussi une courbe normale centrée avec une grande proportion des erreurs qui sont nulles, puis les données avec erreurs maximisées suivent deux courbes normales approximativement réparties de chaque côté du zéro. Cela démontre que le modèle est statistiquement robuste, même en considérant les erreurs de mesure.

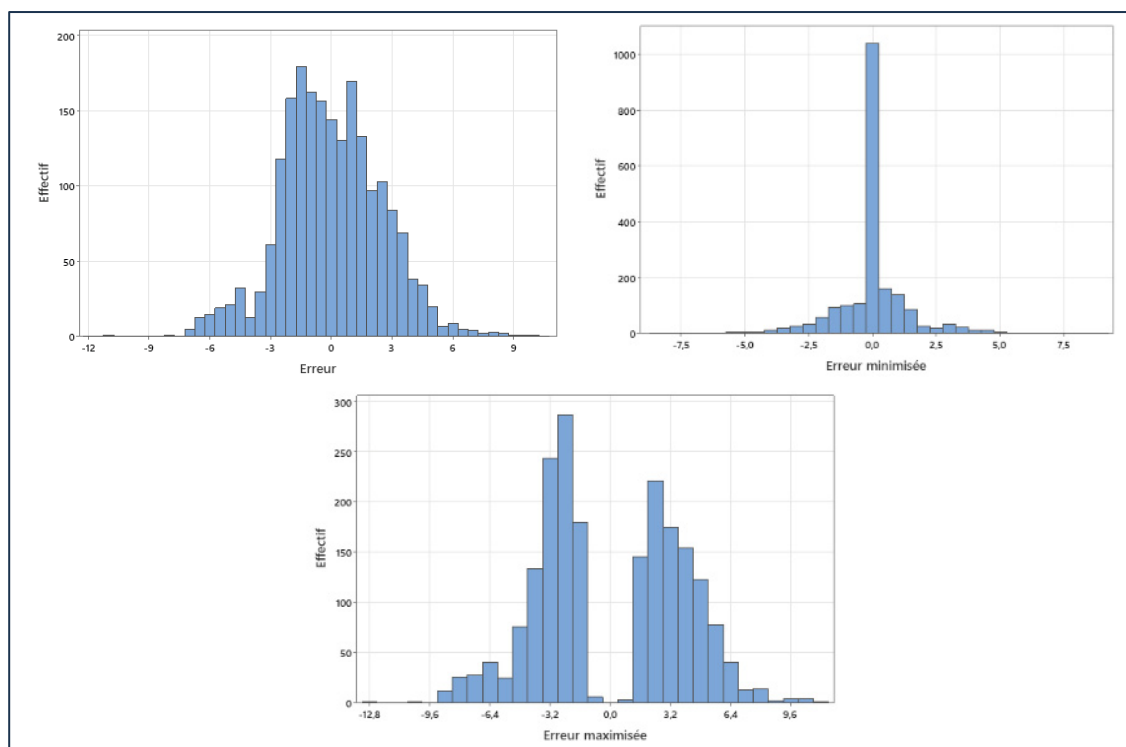


Figure 4.3 Histogrammes des erreurs nominales, minimisées et maximisées

Plusieurs éléments sont manquants pour affirmer que le modèle est valable universellement, tels que des mesures à davantage d'angles d'incidence et des anodisations avec des colorations différentes. Néanmoins, un constat important ne peut pas être réfuté : l'anodisation avec colorant rouge de pièces en aluminium usinées fait diminuer la réflectivité de la surface et cette diminution est beaucoup plus importante avec un faible angle d'incidence.

4.2 Effet de l'état de surface sur la réflectivité

Aucune corrélation valable entre état de surface et réflectivité n'a été trouvée, malgré une analyse élargie de nombreux cas de figure. Il demeure possible qu'une corrélation existe, notamment par l'exploration des pistes suivantes : ajouter des relations non linéaires telles que des identités trigonométriques et des combinaisons plus complexes des fonctions considérées; augmenter le nombre de paramètres permis dans une corrélation à la fois; effectuer des analyses individuelles par outil de coupe plutôt qu'une analyse universelle.

Ces pistes n'ont pas été explorées principalement pour des raisons matérielles et temporelles. L'algorithme développé n'est utilisable que pour des régressions linéaires, donc un nouvel algorithme aurait été requis pour analyser des corrélations avec des identités trigonométriques ou des combinaisons plus complexes de paramètres. Bien que l'algorithme permette en pratique un nombre illimité de paramètres à considérer dans les corrélations, l'augmentation de ce nombre fait augmenter de façon exponentielle le temps d'exécution. Cela est probablement dû à une optimisation déficiente des manipulations des *DataFrame*, un objet Python de la librairie Pandas contenant les données expérimentales. Ces objets grossissent considérablement en augmentant le nombre de paramètres, ce qui ralentit leur manipulation et les calculs effectués sur ceux-ci, avec l'effet combiné qu'un plus gros *DataFrame* sera manipulé plus souvent.

Le choix de ne pas analyser les échantillons par outils de coupe repose sur l'objectif industriel initial de la recherche, soit de trouver une relation universelle entre état de surface et qualité de l'anodisation. Des analyses individuelles vont à l'encontre de ce principe, puisque le champ d'application serait tellement réduit que le moindre changement au procédé de fabrication nécessiterait la construction d'un nouveau modèle. De plus, l'expérience effectuée n'a pas généré assez d'échantillons pour qu'une analyse par outil soit robuste avec le nombre élevé de paramètres considérés.

Pour démontrer que le champ d'application serait très restreint, l'équation (4.3) présente une relation trouvée par l'algorithme en analysant uniquement les échantillons de l'outil E (fraise en bout de 0,750 pouce de diamètre, usinage en périphérie) pour prédire la réflectivité à 60°. Le coefficient de corrélation de Pearson entre la valeur réelle et la valeur prédite est de 0,928 et la Figure 4.4 démontre que la relation est valable en prédiction.

$$\text{Réflectivité } 60^\circ = \frac{359}{Rz1max} + \frac{0,0059 * Rsm^2}{Rz1max} \quad (4.3)$$

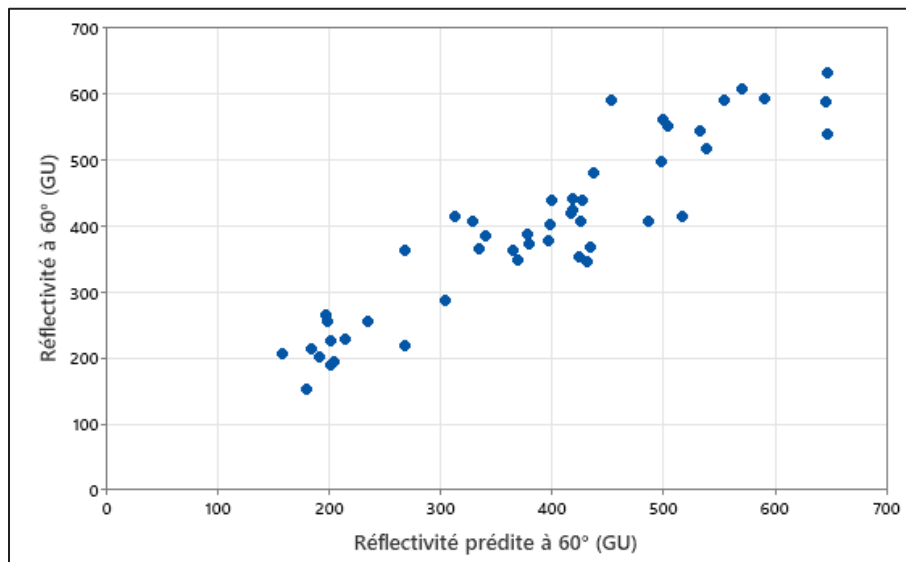


Figure 4.4 Réflectivité prédite pour l'outil E

En appliquant le modèle de l'équation (4.3) aux autres outils et en recalculant les coefficients, il devient évident que ce modèle n'est d'aucune utilité et que de nouveaux modèles doivent être trouvés pour chaque outil. Le Tableau 4.1 présente les modèles ajustés par outil ainsi que les coefficients de corrélation de Pearson entre les valeurs réelles et prédites et la Figure 4.5 illustre ces relations.

Tableau 4.1 Modèles de prédiction ajustés par outil

Outil	Modèle	Coefficient de Pearson
A (paramètres variés)	$\text{Réflectivité } 60^\circ = \frac{642,8}{Rz1max} + \frac{0,000169 * Rsm^2}{Rz1max}$	0,630
A (usure d'outil)	$\text{Réflectivité } 60^\circ = \frac{278,3}{Rz1max} + \frac{0,00088 * Rsm^2}{Rz1max}$	0,544
B	$\text{Réflectivité } 60^\circ = \frac{515,8}{Rz1max} - \frac{0,00158 * Rsm^2}{Rz1max}$	0,425
C	$\text{Réflectivité } 60^\circ = \frac{321,7}{Rz1max} - \frac{0,0023 * Rsm^2}{Rz1max}$	0,482
D	$\text{Réflectivité } 60^\circ = \frac{202,5}{Rz1max} + \frac{0,0275 * Rsm^2}{Rz1max}$	0,761
F	$\text{Réflectivité } 60^\circ = \frac{491}{Rz1max} - \frac{0,00504 * Rsm^2}{Rz1max}$	0,589

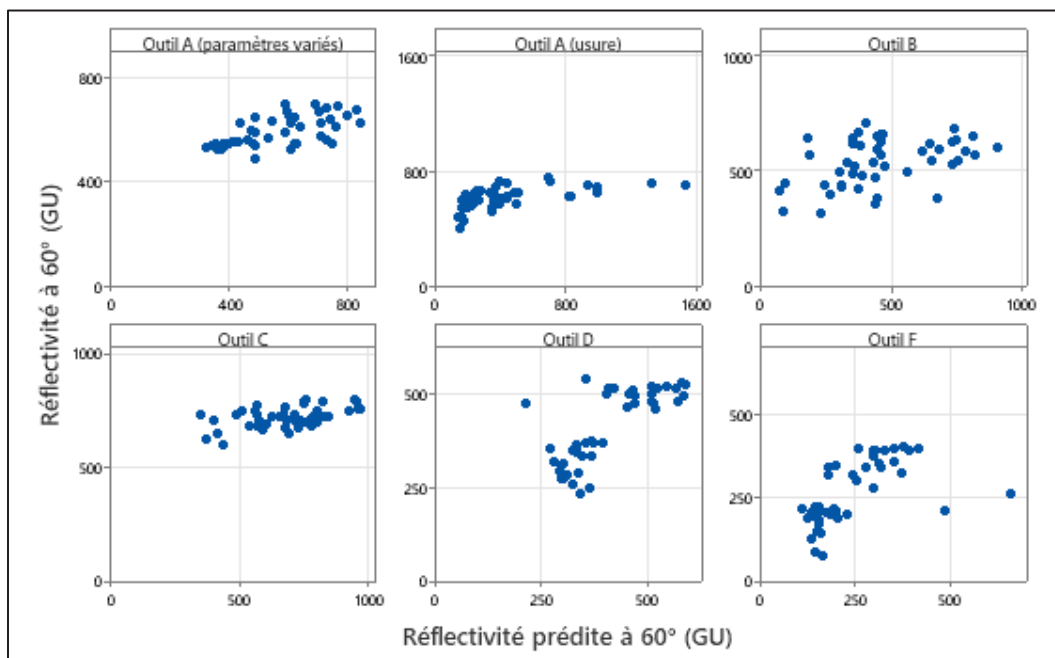


Figure 4.5 Réflectivité prédite par outil

Pour la recherche d'une relation universelle, outre l'ajout de relations non linéaires supplémentaires, il apparaît peu probable que l'augmentation du nombre de paramètres à considérer dans une relation révèle une corrélation valable. Les corrélations relevées comme potentielles par l'algorithme présentaient un défaut dans l'analyse des valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées, soit une pente descendante (voir Figure 3.15). Cela peut s'expliquer par le fait que ces corrélations ont un terme constant nul, c'est-à-dire que l'équation du modèle passe par l'origine, et que les données expérimentales sont réparties également de chaque côté de cette droite. La droite d'ajustement se trouve donc sous les mesures expérimentales pour des petites valeurs, rejoint les mesures pour les valeurs moyennes et les dépasse pour de grandes valeurs. Les autres indicateurs statistiques d'analyse du résidu sont faussés dans ce cas spécifique, puisque la droite d'ajustement répartit l'erreur de part et d'autre des valeurs moyennes pour ainsi obtenir une distribution normale centrée des résidus. Les mêmes paramètres mis en relations, mais avec un terme constant non nul ne présentent donc pas une bonne distribution des valeurs résiduelles et la relation n'est pas retenue par l'algorithme. Cela est démontrable en reprenant le modèle de prédiction de la réflectivité à 60° présenté à la section 3.4.4 : la Figure 4.6 illustre que la droite d'ajustement est sous les petites valeurs et en haut des valeurs élevées, la Figure 4.7 présente les valeurs résiduelles qui suivent une courbe normale centrée à zéro et la Figure 4.8 démontre que ces valeurs résiduelles ne sont pas distribuées aléatoirement.

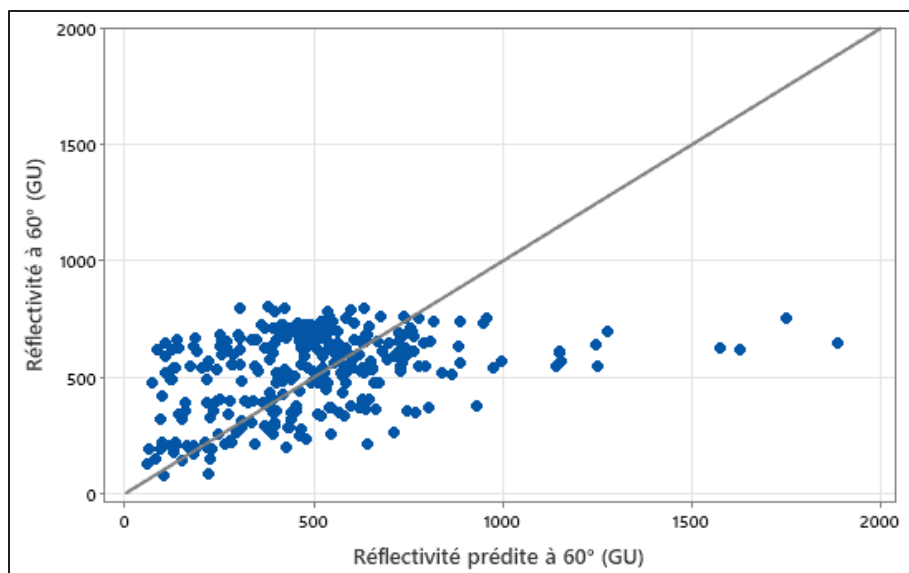


Figure 4.6 Modèle de prédiction biaisé de la réflectivité à 60° avec droite d'ajustement

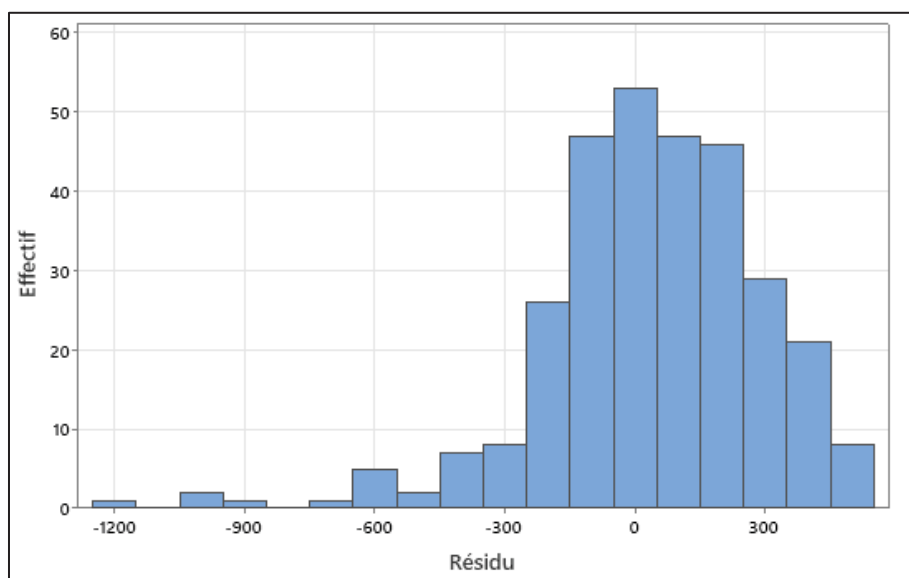


Figure 4.7 Histogramme du résidu d'un modèle biaisé

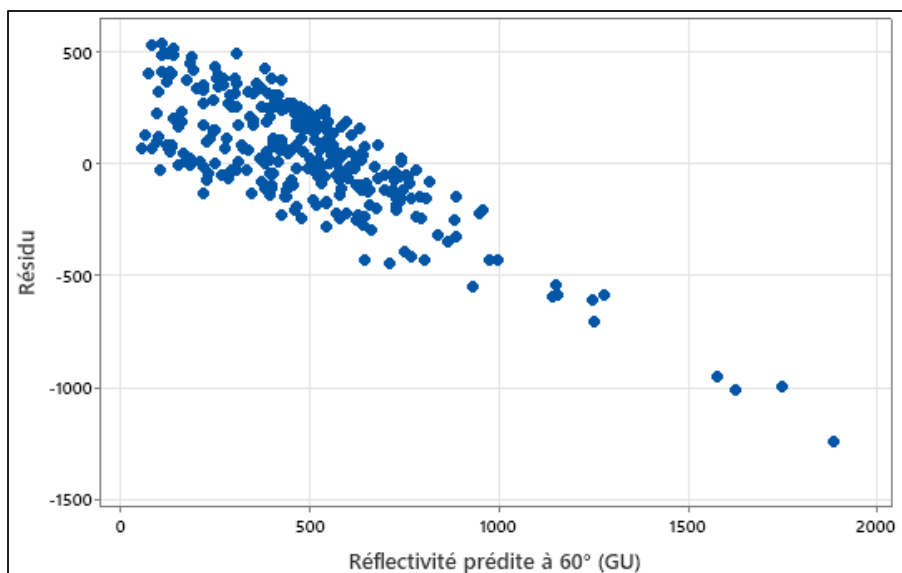


Figure 4.8 Valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites d'un modèle biaisé

Il est peu probable que l'ajout de paramètres supplémentaires corrige cette erreur, puisqu'aucune des combinaisons de 4 paramètres et moins n'a résulté en une corrélation statistiquement valable sur l'ensemble des paramètres testés. De plus, de nombreux paramètres sont colinéaires, donc leur combinaison en grand nombre tend à réduire l'influence de chacun. Par exemple, la Figure 4.9 illustre les corrélations entre la mesure du Ra et d'autres paramètres, où près de la moitié des autres paramètres présentent une colinéarité.

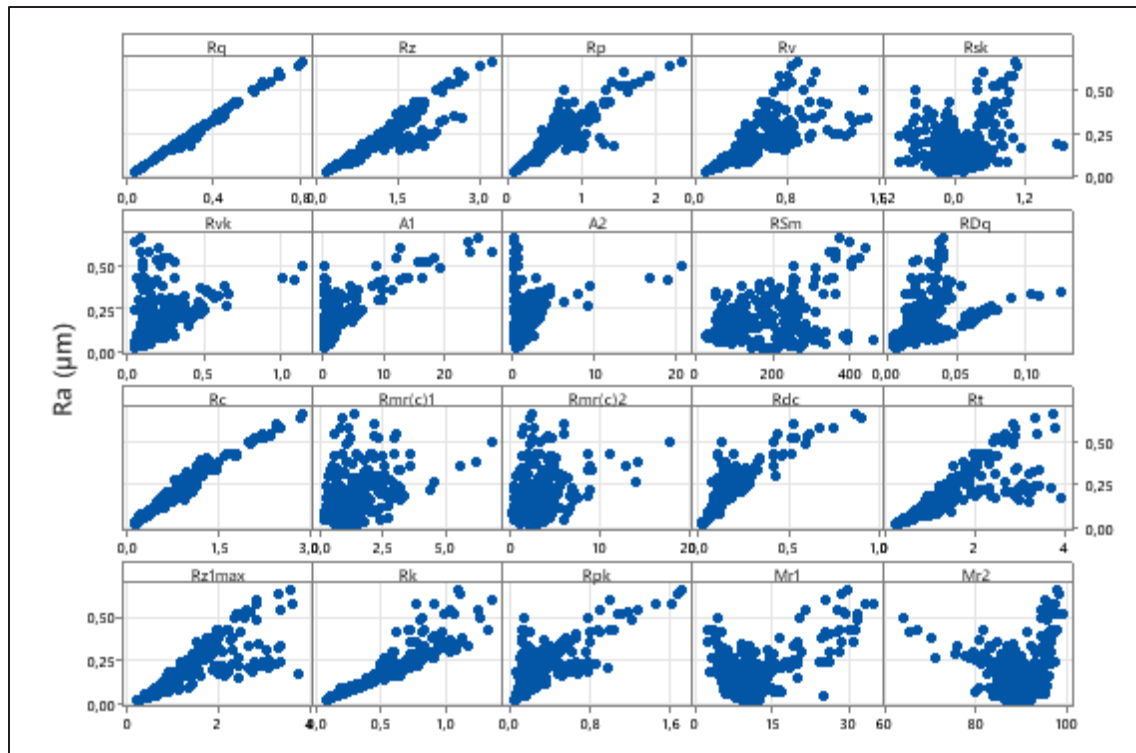


Figure 4.9 Corrélations entre la mesure du Ra et d'autres paramètres mesurés

À l'inverse, les paramètres de sortie ne sont que peu ou pas corrélés à ceux d'entrée. La Figure 4.10 illustre les corrélations entre la réflectivité à 60° et des paramètres d'état de surface et tous les paramètres présentent des distributions adverses aux corrélations : distribution uniforme dans l'espace, agglomération, distribution en entonnoir, ligne verticale, etc.

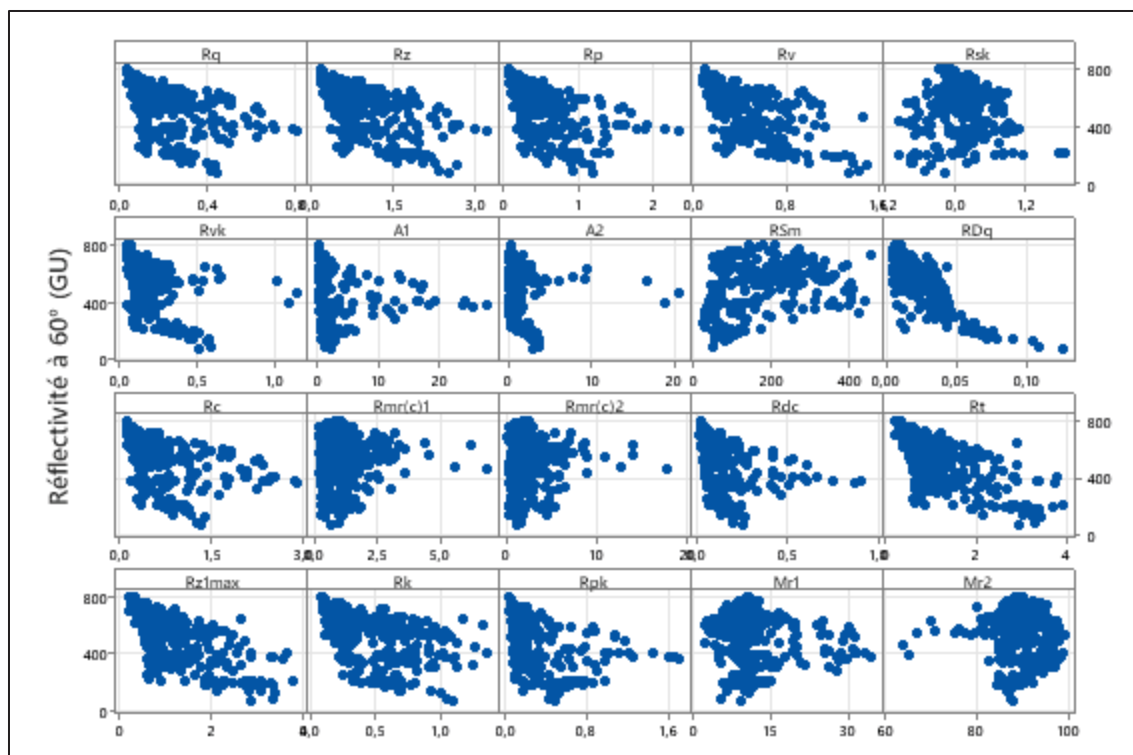


Figure 4.10 Corrélations entre la mesure de la réflectivité à 60° et des paramètres d'état de surface

Il demeure la possibilité que des erreurs de mesure soient en cause, mais il est peu probable que ce soit le cas. Tel que démontré à la section 3.1, les instruments de mesure ont des marges d'erreur restreintes et ont une répétition des lectures constante dans le temps. Chaque valeur de rugosité est une moyenne de trois lectures espacées de 1mm pour réduire la variabilité des mesures et chaque triplet a été individuellement validé pour s'assurer que les lectures individuelles soient similaires, sans quoi les mesures étaient reprises. Les valeurs de réflectivité sont assurément fiables, puisqu'une forte corrélation a été démontrée entre les réflectivités avant et après anodisation.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5.1 Plan d'expérience prévu et observé

Les résultats du plan d'expérience basé sur la variation des paramètres de coupe ne correspondent qu'en partie à ceux attendus, mais ne sont pas pour autant en contradiction avec les résultats d'autres recherches. L'accroissement de la rugosité suivant la vitesse d'avance est en concordance avec la littérature et la théorie, qui définissent ce paramètre comme le plus important (Baek et al., 2001 ; Benardos & Vosniakos, 2003 ; Najiha et al., 2015 ; Srivastava et al., 2021). Cependant, bien que la variation de la vitesse de coupe n'ait pas eu d'effet notable, il est arrivé dans des travaux de recherche que ce paramètre n'exerce pas d'influence importante sur la rugosité (Srivastava et al., 2021). Cette absence d'effet est possiblement due à une trop faible variation du paramètre pour affecter l'action de coupe.

Le plan d'expérience basé sur l'usure d'outil a en revanche généré des résultats opposés à ceux prédits : une diminution de la rugosité est observée plutôt qu'une augmentation (Ashrafi et al., 2013 ; Grzesik, 2008 ; Martins et al., 2021). Bien que contre-intuitif, ce phénomène est bien connu du partenaire industriel : un outil neuf peut parfois générer des vibrations et des rugosités élevées avant de se stabiliser. L'hypothèse avancée est qu'une arête de coupe très tranchante pénètre facilement la matière et tire l'outil, créant une force opposée et alternante avec la force de poussée exercée contre l'outil par l'action de coupe. Cette alternance des forces rapide provoquerait une vibration, ce qui affecte l'état de surface. Après une légère usure, l'arête de coupe ne pénètre plus aussi facilement la matière et ne tire plus l'outil, éliminant l'alternance des forces. Il est probable qu'une augmentation de la rugosité soit observée si l'expérience avait été prolongée. Comme une variation de l'état de surface dans le temps est observée, les données sont quand même utilisées.

5.2 Relation entre état de surface et réflectivité

Bien qu'il soit décevant qu'aucune relation universelle n'ait été trouvée pour relier l'état d'une surface et sa réflectivité, cela correspond en quelque sorte aux résultats d'autres chercheurs. Alors que certains ont affirmé avoir remarqué une augmentation exponentielle de la réflexion spéculaire avec une diminution du R_a (Yonehara et al., 2004), d'autres ont plutôt relié le R_q à la réflectivité tout en admettant que leurs résultats ne correspondent pas avec ceux d'autres chercheurs (Simonsen et al., 2005). Tel que démontré à la section 4.2, il est possible de trouver une relation entre réflectivité et état de surface pour un outil, mais cette relation est difficilement généralisable. Cela rejoint l'idée avancée par Li et al (2018) selon laquelle le R_a peut suivre la réflectivité tant que l'action de coupe durant l'usinage reste constante. L'absence de relation universelle relativement simple explique aussi l'exploration de modèles plus complexes comme celui du BRDF (Horn & Sjoberg, 1979 ; Ohno, 2024).

5.3 Relation entre réflectivités avant et après anodisation

La relation trouvée entre la réflectivité avant et après anodisation est intéressante dans le contexte de ce travail, notamment en conférant une confiance plus élevée aux mesures de réflectivité. Puisqu'une forte corrélation est démontrée entre les réflectivités mesurées avant et après anodisation, il est fort probable que ces données soient fiables et exemptes d'erreurs de lectures qui fausseraient les recherches. Cela a aussi permis de transposer les recherches de relations entre état de surface et réflectivité directement, laissant momentanément de côté l'anodisation, élargissant les retombées potentielles de cette recherche.

Il serait cependant risqué d'affirmer que cette relation est valable dans un contexte d'application plus large, considérant le domaine conscris étudié. En effet, afin de limiter les variations des procédés utilisés durant l'expérimentation, tous les échantillons proviennent d'une même coulée d'aluminium et furent anodisés de la même couleur en même temps. Il est difficile de prédire quels seraient les impacts des variations chimiques entre des lots de matériel, des variations du procédé d'anodisation et même de la couleur choisie sans une étude plus rigoureuse.

D'autres chercheurs ont aussi relevé le phénomène de réduction de la réflectivité avec l'anodisation, mais il s'agissait pour la plupart comme ici d'un sujet secondaire de leur recherche (Aggerbeck et al., 2014 ; Beck & Funk, 2012).

5.4 Effet de l'état de surface sur la qualité du procédé d'anodisation

Considérant qu'aucune relation valable n'a été trouvée, la recherche d'un modèle de prédiction basé sur des mesures simples de rugosité est inconcluante. Il est possible que le choix des métriques de mesure soit en cause, de nombreuses avenues restent encore inexplorées.

Les mesures linéaires de la rugosité et la réflectivité ont été choisies pour leur usage répandu dans l'industrie de même que pour leur standardisation (ASME, 2019 ; ASTM, 2008 ; ISO, 2021), mais l'état d'une surface peut aussi être caractérisé par une rugosité surfacique ou par une analyse en fréquence du profil de forme. De même, la qualité visuelle d'une surface est complexe et aurait pu être analysée par colorimétrie ou analyse d'image. Ces voies ne furent pas explorées en raison de contraintes temporelles et de faisabilité en contexte industriel.

L'impact de la microstructure n'a pas pu être analysé dans cette étude et son effet a été négligé. Bien que souvent cité comme un facteur important dans l'apparition de défaut d'anodisation (Aggerbeck et al., 2014 ; Ma, Zhou, Thompson, Nilsson, et al., 2013 ; Zhu et al., 2009), il est peu probable que la présence de la particule intermétallique Mg_2Si ait faussé les données. En effet, une décoloration locale ou allongée est habituellement observée après anodisation aux zones de présence de cette particule, mais aucune décoloration de ce genre n'a été remarquée. Une analyse de la taille et orientation des grains aurait pu être effectuée, considérant son impact sur la réflectivité après anodisation (Ma, Zhou, Thompson, Nilsson, et al., 2013 ; Zhu et al., 2012, 2009). Cette analyse fut écartée encore une fois pour la contrainte imposée de trouver une relation avec des méthodes d'inspection courantes en industrie.

Il pourrait donc être intéressant pour des chercheurs futurs de se pencher sur le développement de techniques d'analyse rapides et non destructives de la microstructure, considérant que la relation entre microstructure et qualité de l'anodisation est bien connue. Une technologie permettant ce type de mesure résulterait très probablement en des modèles de prédiction robustes de la qualité d'anodisation applicables dans un contexte de production industrielle. Cette approche serait d'ailleurs plus susceptible de mener à une compréhension de la cause profonde de l'apparition des défauts, plutôt que de fournir une simple détection de ceux-ci.

CONCLUSION

L'objectif de cette recherche fut de trouver un lien entre l'état de surface d'une pièce en aluminium usinée et la qualité du procédé d'anodisation, plus spécifiquement entre la rugosité linéaire et la réflectivité, pour une application dans un contexte industriel courant. Bien qu'aucune relation valable ne soit ressortie entre ces paramètres, la pertinence de ce travail se retrouve dans sa démarche rigoureuse qui démontre que l'absence de relation est l'hypothèse à privilégier aux dépens d'une relation occultée.

Après avoir présenté l'état des connaissances dans une revue de littérature, un plan d'expérience basé sur des méthodes d'usinage variées a été établi, puis validé par une analyse des résultats attendus. La prise de mesure a non seulement été renforcée par une moyenne de trois mesures à chaque emplacement, la précision des instruments de mesure a aussi été validée pour assurer une grande validité statistique des données. Considérant le nombre élevé de données, un algorithme a été développé pour analyser chacune des relations entre rugosité et réflectivité, sauvegardant les plus pertinentes pour un examen plus approfondi. Il en est ressorti qu'aucune relation basée sur les modèles sélectionnés ne peut prévoir la réflectivité à l'aide de la rugosité sur l'ensemble du plan d'expérience.

Un phénomène intéressant observé est que l'anodisation fait diminuer la réflectivité et que cette diminution est plus marquée avec un haut angle d'incidence. La généralisation de ce constat n'a cependant pas été démontrée.

Il demeure possible d'établir une relation entre état de surface et qualité de l'anodisation pour des chercheurs futurs, car plusieurs pistes peuvent encore être explorées. Des entités trigonométriques ou le croisement de données peuvent être introduits pour construire des modèles de relation plus complexe. Des métriques de mesure différents peuvent aussi être utilisés, telle la rugosité surfacique pour l'analyse de l'état de surface et la colorimétrie pour la qualité de l'anodisation. L'intelligence artificielle est également une option pour la construction de modèle de prédiction beaucoup plus complexe.

ANNEXE I

MESURES DE LA RUGOSITÉ

1.1 Mesures linéaires de la rugosité

1.1.1 Ra

Le Ra (*Roughness average* ou rugosité moyenne) est très couramment utilisé, puisqu'il donne un aperçu global de la rugosité. Son calcul est la moyenne arithmétique de la distance absolue des pics et vallées $Z(x)$ par rapport à la longueur de base l . Il est peu affecté par l'ondulation et par les irrégularités, car le calcul d'une moyenne tend à réduire l'effet des points extrêmes.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (\text{A I-1})$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 7)

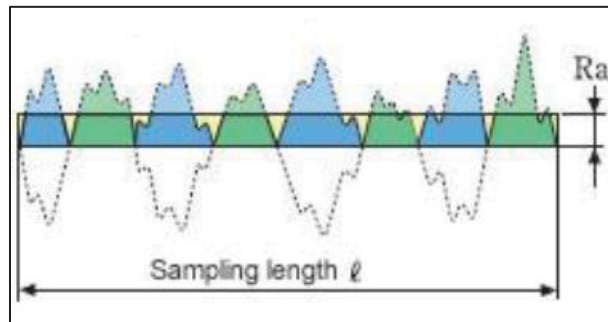


Figure-A I-1 Représentation du Ra

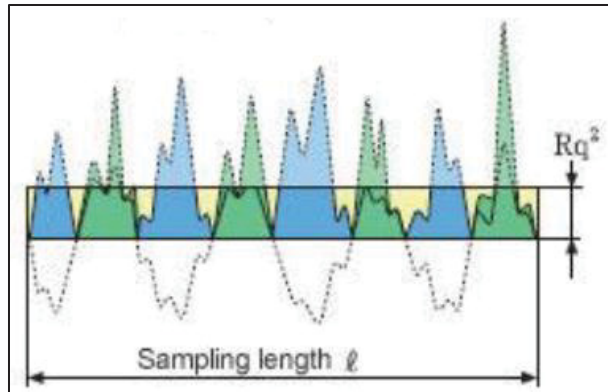
Tirée de Aidibe (2015, p. 7)

1.1.2 Rq

Similaire au Ra, mais mesure l'écart moyen carré de la variation sur une longueur de base l . L'introduction du carré permet de mieux tenir compte des extrêmes.

$$Rq = \left(\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx \right)^{1/2} \quad (\text{A I-2})$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 7)

Figure-A I-2 Représentation du Rq

Tirée de Aidibe (2015, p. 7)

1.1.3 Rp

Hauteur de pic maximale sur la longueur de base l .

$$Rp = \max (Z(x)) \quad (\text{A I-3})$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 9)

1.1.4 Rv

Profondeur de vallée maximale sur la longueur de base l .

$$Rv = \min (Z(x)) \quad (\text{A I-4})$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 9)

1.1.5 Rz

Mesure de la variation maximale, du point le plus creux au point le plus haut sur la longueur de base l . Le Rz est utile pour évaluer la réflectivité, l'aptitude aux traitements de surface et la force de surface et de friction (Aidibe, 2015).

$$Rz = Rp + Rv \quad (\text{A I-5})$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 8)

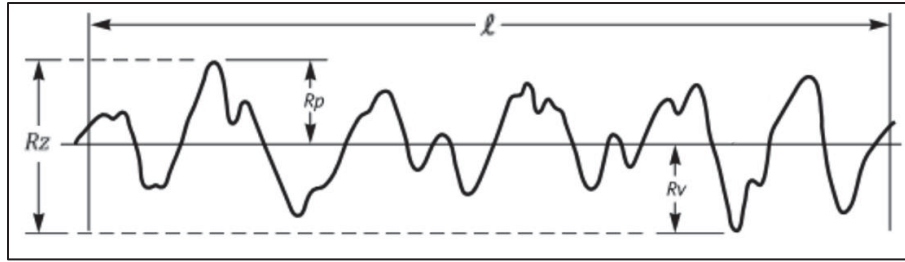


Figure-A I-3 Représentation du Rz, Rp et Rv

Adaptée de ASME B46.1 (2019, p. 7)

1.1.6 Rt

Mesure de la variation maximale, du point le plus creux au point le plus haut sur toute la longueur d'évaluation L . Le Rt évalue les mêmes paramètres que le Rz , mais de façon plus sévère puisque calculé sur toute la longueur d'évaluation plutôt que la longueur de base.

$$Rt = \max(Rp) + \max(Rv) \quad (\text{A I-6})$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 10)

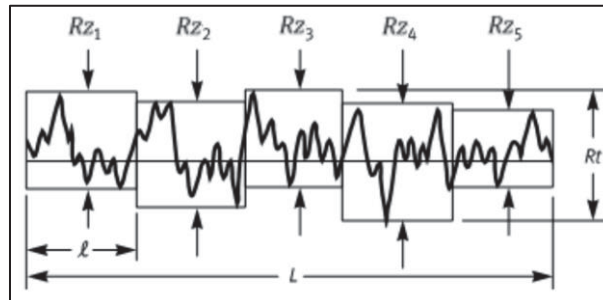


Figure-A I-4 Représentation du Rt

Adaptée de ASME B46.1 (2019, p. 8)

1.1.7 RSm

Mesure l'espacement moyen des éléments du profil, en appliquant une discrimination en hauteur de 10% de Rz et en largeur de 1% de la longueur de base l . Utilisé pour évaluer la réflectivité, l'adhésion et l'aptitude aux traitements de surface (Aidibe, 2015).

$$RSm = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{si} \quad (\text{A I-7})$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 10)

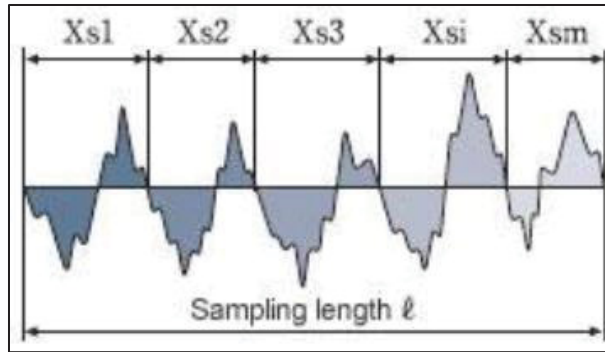


Figure-A I-5 Représentation du RSm

Tirée de Aidibe (2015, p. 10)

1.1.8 RDq

Mesure l'écart moyen au carré de la pente du profil sur la longueur d'évaluation L . Utilisé pour évaluer la réflectivité, l'aptitude aux traitements de surface, la force de friction et la résistance à la corrosion (Aidibe, 2015).

$$RDq = \left(\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{dZ(x)}{dx} \right)^2 dx \right)^{1/2} \quad (\text{A I-8})$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 10)

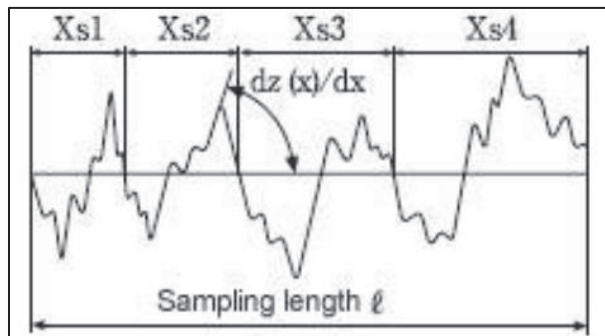


Figure-A I-6 Représentation du RDq

Tirée de Aidibe (2015, p. 10)

1.2 Mesures surfaciques de la rugosité

1.2.1 Sa

Étendue du R_a , son calcul est la moyenne arithmétique de la distance absolue des pics et vallées par rapport à la surface de référence d'aire A .

$$Sa = \frac{1}{A} \int_0^{Ly} \int_0^{Lx} |Z(x,y)| dx dy \quad (\text{A I-9})$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 13)

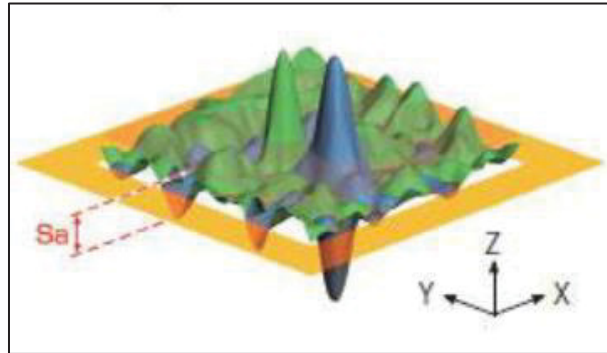


Figure-A I-7 Représentation du Sa
Tirée de Aidibe (2015, p. 13)

1.2.2 Sq

Étendue de Rq, mesure l'écart moyen carré de la variation par rapport à la surface de référence d'aire A.

$$Sq = \left(\frac{1}{A} \int_0^{Ly} \int_0^{Lx} Z^2(x,y) dx dy \right)^{1/2} \quad (\text{A I-10})$$

Tirée de Aidibe (2015, p. 13)

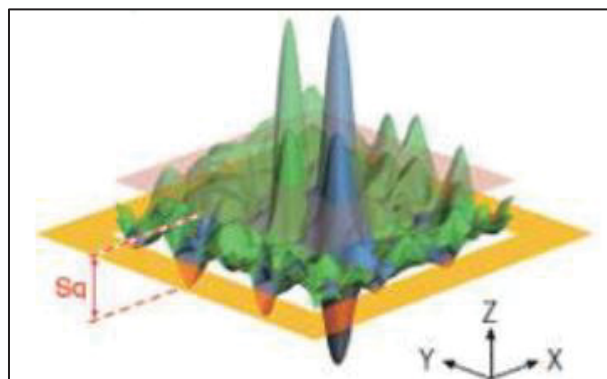


Figure-A I-8 Représentation du Sq
Tirée de Aidibe (2015, p. 13)

1.2.3 Sp

Étendue de Rp, mesure la hauteur de pic maximale par rapport à la surface de référence A.

$$Sp = \max (Z(x, y))$$

(A I-11)

Tirée de Aidibe (2015, p. 13)

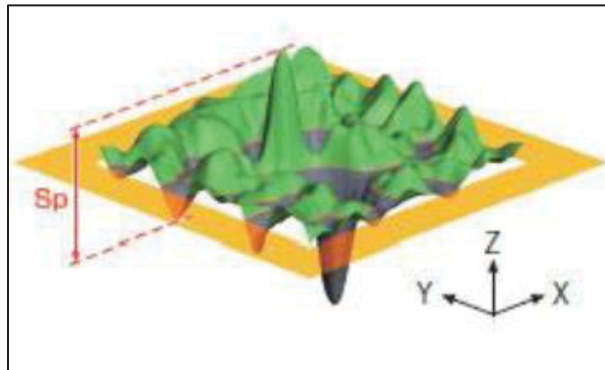


Figure-A I-9 Représentation du Sp

Tirée de Aidibe (2015, p. 13)

1.2.4 Sv

Étendue de Rv, mesure la hauteur de vallée maximale par rapport à la surface de référence A.

$$Sv = \min (Z(x, y))$$

(A I-12)

Tirée de Aidibe (2015, p. 14)

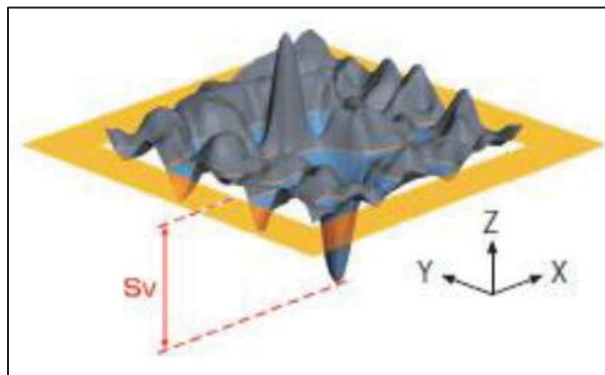


Figure-A I-10 Représentation du Sv

Tirée de Aidibe (2015, p. 14)

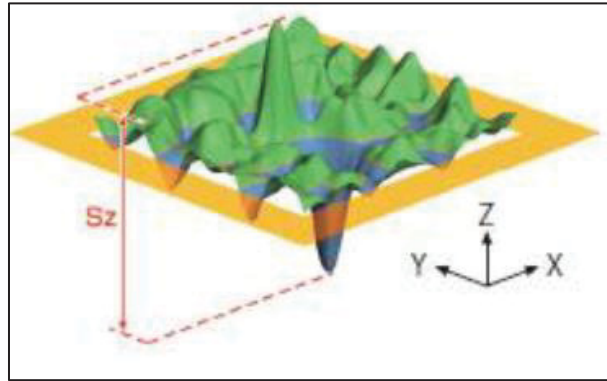
1.2.5 Sz

Étendue de Rz, mesure la variation maximale, du point le plus creux au point le plus haut par rapport à la surface de référence A.

$$S_z = S_p + S_v$$

(A I-13)

Tirée de Aidibe (2015, p. 13)

Figure-A I-11 Représentation du S_z

Tirée de Aidibe (2015, p. 13)

ANNEXE II

PARAMÈTRES DE COUPE DES OUTILS

Les tableaux suivants présentent les paramètres de coupe qui ont été utilisés durant l'usinage des échantillons.

Tableau-A II-1 Paramètres de coupe de l'outil A

Essai	Avance (mm/tour)	Vitesse (mètre/minute)	Avance (mm/minute)	Vitesse (tour/minute)
1	0,216	1017	2753	12750
2	0,216	1197	3238	15000
3	0,216	1376	3724	17250
4	0,254	1017	3238	12750
5	0,254	1197	3810	15000
6	0,254	1376	4382	17250
7	0,292	1017	3724	12750
8	0,292	1197	4382	15000
9	0,292	1376	5039	17250
10	0,330	1017	4210	12750
11	0,330	1197	4953	15000
12	0,330	1376	5696	17250

Tableau-A II-2 Paramètres de coupe de l'outil B

Essai	Avance (mm/tour)	Vitesse (mètre/minute)	Avance (mm/minute)	Vitesse (tour/minute)
1	0,208	848	1101	5313
2	0,208	997	1295	6250
3	0,208	1147	1490	7188
4	0,244	848	1295	5313
5	0,244	997	1524	6250
6	0,244	1147	1753	7188
7	0,279	848	1490	5313
8	0,279	997	1753	6250
9	0,279	1147	2015	7188
10	0,318	848	1684	5313
11	0,318	997	1981	6250
12	0,318	1147	2278	7188

Tableau-A II-3 Paramètres de coupe de l'outil C

Essai	Avance (mm/tour)	Vitesse (mètre/minute)	Avance (mm/minute)	Vitesse (tour/minute)
1	0,302	653	1237	4092
2	0,302	768	1455	4814
3	0,302	884	1673	5536
4	0,356	653	1455	4092
5	0,356	768	1712	4814
6	0,356	884	1969	5536
7	0,409	653	1673	4092
8	0,409	768	1969	4814
9	0,409	884	2264	5536
10	0,462	653	1892	4092
11	0,462	768	2225	4814
12	0,462	884	2559	5536

Tableau-A II-4 Paramètres de coupe de l'outil D

Essai	Avance (mm/tour)	Vitesse (mètre/minute)	Avance (mm/minute)	Vitesse (tour/minute)
1	0,221	2655	2455	11087
2	0,221	3122	2888	13043
3	0,221	3591	3322	15000
4	0,262	2655	2888	11087
5	0,262	3122	3525	13043
6	0,262	3591	3908	15000
7	0,300	2655	3322	11087
8	0,300	3122	3908	13043
9	0,300	3591	4494	15000
10	0,338	2655	3755	11087
11	0,338	3122	4417	13043
12	0,338	3591	5080	15000

Tableau-A II-5 Paramètres de coupe de l'outil E

Essai	Avance (mm/tour)	Vitesse (mètre/minute)	Avance (mm/minute)	Vitesse (tour/minute)
1	0,264	458	2019	7650
2	0,264	539	2375	9000
3	0,264	619	2731	10350
4	0,310	458	2375	7650
5	0,310	539	2794	9000
6	0,310	619	3213	10350
7	0,358	458	2731	7650
8	0,358	539	3213	9000
9	0,358	619	3695	10350
10	0,404	458	3087	7650
11	0,404	539	3632	9000
12	0,404	619	4177	10350

Tableau-A II-6 Paramètres de coupe de l'outil F

Essai	Avance (mm/tour)	Vitesse (mètre/minute)	Avance (mm/minute)	Vitesse (tour/minute)
1	0,071	240	908	12750
2	0,071	283	1069	15000
3	0,071	325	1102	17250
4	0,084	240	1069	12750
5	0,084	283	1257	15000
6	0,084	325	1446	17250
7	0,097	240	1229	12750
8	0,097	283	1446	15000
9	0,097	325	1663	17250
10	0,109	240	1389	12750
11	0,109	283	1634	15000
12	0,109	325	1880	17250

ANNEXE III


CERTIFICAT DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES ÉCHANTILLONS

Ce certificat a été délivré par le fournisseur de matière première lors de la livraison des échantillons. Tous les échantillons proviennent de la même coulée et ont été coupés par le partenaire industriel.

From: TR Materials CA, Ltd.
 CUST: SMP TECH INC
 GRATE
 WTL: 70.553 LB

CSTOR: 351
 Date: 10/29/2024

DEL: 2410314666



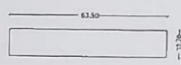
LB ALUMINIUM BERHAD
 (19850)006093 (138535-V)

ALUMINIUM EXTRUSION

TEST CERTIFICATE

CUSTOMER: THYSSENKRUPP MATERIALS CA, LTD	SECTION NO.: PD01228MFD3660	DATE: Jul-04-2024
SALES ORDER NO.: 2588534	WORK ORDER: 375198	ALLOY: 6061-T6511
PRESS NO.: 2600	EXTRUSION DATE: Jun-24-2024	CERTIFICATE NO.: CN2409465
CUSTOMER PO NO.: 5400719259-R01*		

Section Sketch:



Thickness = 12.70 mm

CHEMICAL COMPOSITION										
Composition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	Analysis Ref.
Min	0.40	0.00	0.15	0.00	0.80	0.04	0.00	0.00		14928
Max	0.80	0.70	0.40	0.15	1.20	0.35	0.25	0.15	Remainder	
Actual	0.6960	0.2010	0.2530	0.0380	1.0050	0.0840	0.0010	0.0200		Jun-21-2024

MECHANICAL PROPERTIES (Results shown as tested by LBALUM)				
	Tensile Strength N/mm ²	Yield Strength 0.2% Offset N/mm ²	Elongation (%) in 50mm	Hardness (Webster model B)
Standard (Min)	240	249	10	13
Result	324.61	220.81	16.22	16

We hereby certify that the material covered by this report has been verified as noted according to the rules stated regarding its field or the requirements of any specification or requirements described herein, and that sample representative of the material over the representative block and has the mechanical properties shown. Also, note the accuracy is not a certified requirement or tolerance shown. Further accuracy can be obtained by comparison of test specimens. This certificate conforms to S.I. 225 (1996).

** This certificate of Analysis has been produced electronically and is valid without signature **

Lot 11, Jalan Perusahaan 1, Kawasan Perusahaan Beranang, 43700 Beranang, Selangor Darul Ehsan, Malaysia.
 Tel: 603-8725 8822 (General), 8725 8833 (Sales) Fax: 603-8725 8828 (General), 8725 8826 (Sales), 8725 8866 (Export)
 enquiry@lbalum.com.my www.lbalum.com

Figure-A III-1 Certificat de la composition chimique des échantillons

ANNEXE IV

CALCULS DES ERREURS DES INSTRUMENTS

Les calculs suivants supposent que les erreurs des instruments suivent une loi de distribution gaussienne.

4.1 Erreur du rugosimètre :

Erreur issue de la résolution minimale de $0,001\mu m$:

$$u_{résolution} = \frac{0,001\mu m}{\sqrt{12}} = 0,000289\mu m \quad (\text{A IV-1})$$

Erreur de répétabilité du Ra (écart-type calculé sur les mesures de l'étalon) :

$$u_{répétabilité Ra} = 0,0301\mu m \quad (\text{A IV-2})$$

Erreur absolue sur le Ra pour une valeur de $3,05\mu m$:

$$u_{Ra} = \sqrt{u_{résolution}^2 + u_{répétabilité Ra}^2} = 0,03\mu m \quad (\text{A IV-3})$$

Erreur du Ra pour une lecture de $3,05\mu m$:

$$U_{Ra} = \pm 0,06\mu m \text{ à } 95\% \quad (\text{A IV-4})$$

Erreur relative sur le Ra :

$$U_{Ra\%} = \frac{U_{Ra}}{Réf} * 100 = \pm 1,97\% \text{ à } 95\% \quad (\text{A IV-5})$$

Erreur de répétabilité du Rz (écart-type calculé sur les mesures de l'étalon) :

$$u_{répétabilité Rz} = 0,1216\mu m \quad (\text{A IV-6})$$

Erreur absolue sur le Rz pour une valeur de $9,9\mu m$:

$$u_{Rz} = \sqrt{u_{résolution}^2 + u_{répétabilité Rz}^2} = 0,12\mu m \quad (\text{A IV-7})$$

Erreur du Rz pour une lecture de 9,9 μ m :

$$U_{Rz} = \pm 0,24\mu m \text{ à } 95\% \quad (\text{A IV-8})$$

Erreur relative sur le Rz :

$$U_{Rz\%} = \frac{U_{Rz}}{Réf} * 100 = \pm 2,46\% \text{ à } 95\% \quad (\text{A IV-9})$$

4.2 Erreur du réflectomètre :

Erreur issue de la résolution minimale de 0,1GU pour des lectures de moins de 100GU :

$$u_{résolution} = \frac{0,1GU}{\sqrt{12}} = 0,029GU \quad (\text{A IV-10})$$

Erreur de répétabilité pour les lectures à 20° (écart-type calculé sur les mesures de l'étalon) :

$$u_{répétabilité\ 20^\circ} = 0,23GU \quad (\text{A IV-11})$$

Erreur absolue sur les lectures à 20° pour une valeur de 89,2GU :

$$u_{20^\circ} = \sqrt{u_{résolution}^2 + u_{répétabilité\ 20^\circ}^2} = 0,23GU \quad (\text{A IV-12})$$

Erreur des lectures à 20° pour une valeur de 89,2GU :

$$U_{20^\circ} = \pm 0,46GU \text{ à } 95\% \quad (\text{A IV-13})$$

Erreur relative sur les lectures à 20° :

$$U_{20^\circ\%} = \frac{U_{20^\circ}}{Réf} * 100 = \pm 0,52\% \text{ à } 95\% \quad (\text{A IV-14})$$

Erreur de répétabilité pour les lectures à 60° (écart-type calculé sur les mesures de l'étalon) :

$$u_{répétabilité\ 60^\circ} = 0,12GU \quad (\text{A IV-15})$$

Erreur absolue sur les lectures à 60° pour une valeur de 92,8GU :

$$u_{60^\circ} = \sqrt{u_{résolution}^2 + u_{répétabilité\ 60^\circ}^2} = 0,13GU \quad (\text{A IV-16})$$

Erreur des lectures à 60° pour une valeur de 92,8GU :

$$U_{60^\circ} = \pm 0,26GU \text{ à } 95\% \quad (\text{A IV-17})$$

Erreur relative sur les lectures à 60° :

$$U_{60^\circ\%} = \frac{U_{60^\circ}}{Réf} * 100 = \pm 0,28\% \text{ à } 95\% \quad (\text{A IV-18})$$

Erreur de répétabilité pour les lectures à 85° (écart-type calculé sur les mesures de l'étalon) :

$$u_{répétabilité\ 85^\circ} = 0,09GU \quad (\text{A IV-19})$$

Erreur absolue sur les lectures à 85° pour une valeur de 99,0GU :

$$u_{85^\circ} = \sqrt{u_{résolution}^2 + u_{répétabilité\ 85^\circ}^2} = 0,09GU \quad (\text{A IV-20})$$

Erreur des lectures à 85° pour une valeur de 99,0GU :

$$U_{85^\circ} = \pm 0,19GU \text{ à } 95\% \quad (\text{A IV-21})$$

Erreur relative sur les lectures à 85° :

$$U_{85^\circ\%} = \frac{U_{85^\circ}}{Réf} * 100 = \pm 0,19\% \text{ à } 95\% \quad (\text{A IV-22})$$

ANNEXE V

ALGORITHMES DE RECHERCHE DE RÉGRESSIONS

Algorithme V-1 Main.py

```
#Ce programme sert à calculer des régressions linéaires en itérant sur des combinaisons de
paramètres d'entrée et sur un paramètre de sortie
#Il utilise les fonctions de la bibliothèque Interactions et Regressions pour créer des
régressions linéaires multiples
#Il utilise la bibliothèque Pandas pour manipuler les données et la bibliothèque Statsmodels
pour effectuer les régressions linéaires
#L'utilisateur fournit les données sous forme de fichier Excel
#Un nouveau fichier Excel est créé pour stocker les résultats des régressions
#Les seuils statistiques et le nombre de paramètres à considérer sont définis par l'utilisateur
#Le programme effectue ensuite toutes les régressions possibles sur les paramètres d'entrée
#Les régressions qui respectent les seuils sont sauvegardées dans le fichier Excel de sortie

#Auteur : Martin Chaveca
#Date : Hiver 2025
#Programme : Python 3.10.6
#Ce programme a été écrit dans le cadre d'une maîtrise avec mémoire en génie mécanique à
l'École de technologie supérieure (ÉTS)
#Les intelligences artificielles suivantes ont été utilisées pour aider à la rédaction du code, de
la syntaxe et de l'optimisation :
#ChatGPT 4.0 (OpenAI, 2025), Copilot (GitHub, 2025), Claude Sonnet 3.7
(Anthropic, 2025)
#La logique du programme et des fonctions a été écrite par l'auteur

#Importation des fonctions nécessaires
import Interactions
import Regressions

#Constantes
#Fichiers Excel par défaut
FICHIER_ENTREE = "Donnees.xlsx"
FICHIER_SORTIE = "Donnees.xlsx"
FEUILLE_ENTREE = "Entrees"
FEUILLE_SORTIE = "Sorties"

#Variables
#Seuils par défaut pour les tests statistiques
seuils = {'un_parametre': 0.10,      #R^2 pour le test des paramètres un à un
          'deux_parametres': 0.30,   #R^2 pour le test des paramètres deux à deux
```

```

'r': 0.85,          #Corrélation (R^2 ajusté)
'f_test': 0.05,     #Signification globale du modèle (F-test)
'p_value_coefficients': 0.05, #Signification des coefficients (P-value)
'bp': 0.05,         #Test d'homoscédasticité (Breusch-Pagan)
'ad': 0.05,         #Test de normalité des résidus (Anderson-Darling)
'dw_min': 1.5,      #Test d'autocorrélation des résidus min (Durbin-Watson)
'dw_max': 2.5,      #Test d'autocorrélation des résidus max (Durbin-Watson)
'residus_abberants': 0.05, #Test des valeurs abberantes des résidus (score Z)
'vif': 10,          #Test de multicollinéarité (VIF)
'score_regression': 7 #Score requis sur les seuils pour conserver la régression
}

```

```

nb_parametres = {'parametres_combines': 3, 'termes_max': 10} #Nombre de paramètres et de
termes à considerer à la fois dans une régression

```

```

#Demande à l'utilisateur de choisir les fichiers Excel d'entrée et de sortie et le paramètre de
sortie

```

```

#Reçoit un dictionnaire qui contient les dataframes d'entrée et de sortie et le paramètre de
sortie

```

```

parametres = Interactions.creer_parametres_entree_sortie(FICHER_ENTREE,
FICHER_SORTIE, FEUILLE_ENTREE, FEUILLE_SORTIE)

```

```

#Demande à l'utilisateur de choisir les seuils pour les tests statistiques

```

```

seuils = Interactions.definir_seuils(seuils)

```

```

#Demande à l'utilisateur de choisir le nombre de paramètres à considérer à la fois dans une
régression

```

```

nb_parametres = Interactions.definir_nb_parametres(nb_parametres)

```

```

#Création d'une liste qui contient : le fichier Excel qui contiendra les résultats des régressions
[0], le nom de la feuille [1] et le compteur de feuilles [2]

```

```

#Création du fichier Excel qui contiendra les résultats des régressions

```

```

#Sauvegarde dans la première feuille les seuils utilisés et le nombre de paramètres considérés

```

```

#Chaque régression pertinente sera sauvegardée dans une nouvelle feuille

```

```

noms_excel =
Interactions.creer_fichier_excel(parametres['sortie'].columns[parametres['parametre_sortie']],
seuils, nb_parametres)

```

```

#Exécution des régressions

```

```

Regressions.executer_regressions(parametres, seuils, noms_excel, nb_parametres)

```

Algorithme V-2 Regressions.py

```

#Ce fichier comporte les fonctions pour effectuer les régressions linéaires et les tests
statistiques
#À partir de dataframes reçus, un tri est effectué pour ne garder que les paramètres pertinents
selon les seuils définis
#Les paramètres retenus sont combinés entre eux selon le nombre de paramètres à considérer
pour générer toutes les combinaisons possibles
#Les régressions sont effectuées sur les combinaisons puis sont testées selon les seuils définis
#Les régressions qui passent les tests sont sauvegardées dans un fichier Excel

#Auteur : Martin Chaveca
#Date : Hiver 2025
#Programme : Python 3.10.6
#Ce programme a été écrit dans le cadre d'une maîtrise avec mémoire en génie mécanique à
l'École de technologie supérieure (ÉTS)
#Les intelligences artificielles suivantes ont été utilisées pour aider à la rédaction du code, de
la syntaxe et de l'optimisation :
#ChatGPT 4.0 (OpenAI, 2025), Copilot (GitHub, 2025), Claude Sonnet 3.7
(Anthropic, 2025)
#La logique du programme et des fonctions a été écrite par l'auteur

#Importation des librairies standards
import os
import numpy as np
import pandas as pd
import statsmodels.api as sm
from statsmodels.stats.outliers_influence import variance_inflation_factor
import time
import itertools
from itertools import combinations

#Importation des librairies personnelles
import Interactions

#Fonction mère qui va exécuter les boucles de régressions
def executer_regressions(parametres, seuils, noms_excel, nb_parametres):
    #Réduction des paramètres d'entrée
    tri_un_parametre = tester_un_parametre(parametres['sortie'],
parametres['parametre_sortie'], parametres['entree'], seuils['un_parametre'])
    tri_deux_parametres = tester_deux_parametres(parametres['sortie'],
parametres['parametre_sortie'], tri_un_parametre, seuils['deux_parametres'])

    #Calcul de toutes les combinaisons possibles des paramètres retenus
    indices_combis = combinations(range(tri_deux_parametres.columns.size),
nb_parametres['parametres_combines'])

```

```

#Liste des régressions pour ne pas sauvegarder deux fois la même régression
regressions_sauvegardees = set()

#Variables pour pouvoir afficher dans le terminal l'avancement
#Le temps écoulé par paramètre et le nombre de régressions sauvegardées sont affichés
temps_debut_i = time.time()
temps_debut_j = time.time()
dernier_i = -1
dernier_j = -1
nb_regressions = int(noms_excel[2])
nb_nouvelles_regressions = nb_regressions

for combi in indices_combis:
    #i et j sont extraits de la combinaison pour afficher l'avancement
    i, j, *rest = combi

    #Affichage du paramètre sur lequel on itère, le nombre de régressions trouvées et le
    temps écoulé
    if i != dernier_i:
        nb_nouvelles_regressions = int(noms_excel[2]) - nb_regressions
        nb_regressions = int(noms_excel[2])
        print("Régressions trouvées : " + str(nb_nouvelles_regressions))
        temps_ecoule_i = time.time() - temps_debut_i
        temps_debut_i = time.time()
        print("Temps pour la dernière itération : " + time.strftime("%H:%M:%S",
time.gmtime(temps_ecoule_i)))
        print(tri_deux_parametres.columns[i], end="\n")
        dernier_i = i

    #Affichage du temps écoulé lorsque j change
    if j != dernier_j:
        temps_ecoule_j = time.time() - temps_debut_j
        temps_debut_j = time.time()
        print(str(j - i) + " / " + str(tri_deux_parametres.columns.size - i) + " " +
time.strftime("%H:%M:%S", time.gmtime(temps_ecoule_j)), end='\r')
        dernier_j = j

    #Calcul des combinaisons de paramètres et exécution des régressions
    combi_param = creer_combinaisons(tri_deux_parametres, indices=combi)
    #Vérification que la combinaison ne contienne pas de paramètres constants (par
exemple Ra*1/Ra)
    aucun_parametre_constant = True
    for z in range(combi_param.columns.size):

```



```

        if combi_param.iat[2,z] > 0.99 and combi_param.iat[2,z] < 1.01 and
combi_param.iat[10,z] > 0.99 and combi_param.iat[10,z] < 1.01:
            aucun_parametre_constant = False
            if aucun_parametre_constant:
                regresse_avec_iterations(parametres['sortie'], parametres['parametre_sortie'],
combi_param, noms_excel, nb_parametres['termes_max'], seuils, regressions_sauvegardees)

            print("\nFin des régressions\n")

#Fonction pour effectuer les tests statistiques sur la régression
#Retourne True si la régression est significative sur un nombre défini de tests
#Le R^2 ajusté est testé avant l'appel de la fonction, car il est le plus important et le plus
rapide à évaluer
def teste_regression(resultat, seuils, donnees_entree):
    #Dictionnaire pour stocker les résultats des tests
    tests_statistiques = {}

    #Test de la signification globale du modèle (F-test)
    #Vérifie que la variabilité du modèle est bien expliquée par les variables
    tests_statistiques['f_test'] = resultat.f_pvalue < seuils['f_test']

    #Test des p-values des coefficients
    #Vérifie que tous les coefficients sont significatifs
    #Le premier terme est ignoré s'il est constant
    if 'const' in donnees_entree.columns:
        tests_statistiques['coefficients'] = np.all(resultat.pvalues[1:] <
seuils['p_value_coefficients'])
    else:
        tests_statistiques['coefficients'] = np.all(resultat.pvalues[0:] <
seuils['p_value_coefficients'])

    #Test de normalité des résidus (Anderson-Darling)
    #Vérifie que les résidus suivent une distribution normale
    test_ad = sm.stats.diagnostic.normal_ad(resultat.resid)
    tests_statistiques['normalite_des_residus'] = test_ad[1] > seuils['ad']

    #Test d'autocorrélation des résidus (Durbin-Watson)
    #Vérifie que les résidus sont indépendants
    tests_statistiques['durbin_watson'] = seuils['dw_min'] <
sm.stats.stattools.durbin_watson(resultat.resid) < seuils['dw_max']

    #Test des valeurs aberrantes des résidus
    #Vérifie que la proportion des valeurs aberrantes n'est pas trop élevée
    residu_zscore = np.abs((resultat.resid - np.mean(resultat.resid)) / np.std(resultat.resid))

```

```

tests_statistiques['residus_abberants'] = np.sum(residu_zscore > 3) / len(residu_zscore) <
seuils['residus_abberants']

#Vérification préliminaire si la régression peut être conservée ou rejetée, car les calculs
suivants sont plus long que la vérification
score_regression = sum(tests_statistiques[k] for k in tests_statistiques)
if score_regression < seuils['score_regression'] - 2:
    return False
elif score_regression >= seuils['score_regression']:
    return True

#Test d'hétéroscédasticité (Breusch-Pagan)
#Vérifie si la variance des résidus est corrélée aux variables indépendantes
#Un terme constant est requis pour faire le test et est donc ajouté si absent
if 'const' in donnees_entree.columns:
    test_bp = sm.stats.diagnostic.het_breuschpagan(resultat.resid, resultat.model.exog)
else:
    resultat_avec_constante = sm.add_constant(resultat.model.exog)
    test_bp = sm.stats.diagnostic.het_breuschpagan(resultat.resid, resultat_avec_constante)
tests_statistiques['homoscedasticite'] = test_bp[1] > seuils['bp']

#Vérification préliminaire si la régression peut être conservée ou rejetée, car les calculs
suivants sont plus long que la vérification
score_regression = sum(tests_statistiques[k] for k in tests_statistiques)
if score_regression < seuils['score_regression'] - 1:
    return False
elif score_regression >= seuils['score_regression']:
    return True

#Test de multicolinéarité (VIF)
#Vérifie que les coefficients ne sont pas colinéaires
#Le dataframe d'entrée est copié pour ne pas modifier l'original
#Les données vides sont retirées, sinon la fonction ne marche pas
#La régression a été calculée sans les données vides donc demeure proche du vrai VIF
donnees_vif = donnees_entree.dropna(inplace=False)
if 'const' in donnees_vif.columns:
    vifs = [variance_inflation_factor(donnees_vif.values, i+1) for i in
range(donnees_vif.shape[1] - 1)]
else:
    vifs = [variance_inflation_factor(sm.add_constant(donnees_vif).values, i+1) for i in
range(donnees_vif.shape[1])]
tests_statistiques['vif'] = all(vif < seuils['vif'] for vif in vifs)

#Score de la régression
#Vérification que le nombre requis de tests sont réussis

```

```

score_regression = sum(tests_statistiques[k] for k in tests_statistiques)
return score_regression >= seuils['score_regression']

#Fonction pour effectuer une régression linéaire
#Effectue une régression avec ou sans constante selon le premier terme de la liste d'entrée
#Vérifie si la régression est significative et la sauvegarde dans un fichier Excel le cas échéant
def regresse(donnees_sortie, index_sortie, donnees_entree, liste_entree, noms_excel, seuils,
regressions_sauvegardees):
    #Le terme 0 de la liste est le terme constant donc on considère la constante dans la
    régression
    if liste_entree[0] == 0:
        modele = sm.OLS(donnees_sortie.iloc[:,index_sortie],donnees_entree.iloc[:,
liste_entree], missing='drop', hasconst=True)
        resultat = modele.fit()
        if resultat.rsquared > seuils['r']:
            nouvelle_regression = donnees_entree.iloc[:, liste_entree].columns.tolist()
            #Teste si la régression est significative
            if teste_regression(resultat, seuils, donnees_entree.iloc[:, liste_entree]):
                #Vérification que la régression n'a pas déjà été sauvegardée, car les boucles
                génèrent quelques doublons
                if tuple(nouvelle_regression) not in regressions_sauvegardees:
                    regressions_sauvegardees.add(tuple(nouvelle_regression))
                #Sauvegarde de la régression dans le fichier Excel
                parametres_retenus =
pd.concat([pd.DataFrame(donnees_sortie.iloc[:,index_sortie]),
pd.DataFrame(donnees_entree.iloc[:, liste_entree])], axis=1)
                Interactions.ecrire_parametres(parametres_retenus, noms_excel)
            else:
                modele = sm.OLS(donnees_sortie.iloc[:,index_sortie],donnees_entree.iloc[:,
liste_entree], missing='drop', hasconst=False)
                resultat = modele.fit()
                if resultat.rsquared > seuils['r']:
                    nouvelle_regression = donnees_entree.iloc[:, liste_entree].columns.tolist()
                    if teste_regression(resultat, seuils, donnees_entree.iloc[:, liste_entree]):
                        if tuple(nouvelle_regression) not in regressions_sauvegardees:
                            regressions_sauvegardees.add(tuple(nouvelle_regression))
                            parametres_retenus =
pd.concat([pd.DataFrame(donnees_sortie.iloc[:,index_sortie]),
pd.DataFrame(donnees_entree.iloc[:, liste_entree])], axis=1)
                            Interactions.ecrire_parametres(parametres_retenus, noms_excel)

#Fonction récursive pour itérer sur toutes les combinaisons de paramètres d'entrée
#Effectue les régressions seulement pour si la combinaison a un nombre de paramètres égal
ou inférieur aux nombre de termes maximum

```

```

#Effectue autant de régressions que le nombre de combinaisons possibles, en excluant les
combinaisons qui ne comprennent pas le terme premier terme ou une de ses combinaisons
#Cela évite de faire des régressions qui seront exécutées plus tard
def regresse_avec_iterations(donnees_sortie, index_sortie, donnees_entree, noms_excel,
nb_combinaisons, seuils, regressions_sauvegardees):
    #Ajout du terme constant au dataframe d'entrée
    #Le terme constant est considéré comme un paramètre pour la génération des
combinaisons, il sera détecté par la fonction regresse()
    donnees_entree = sm.add_constant(donnees_entree)
    terme_original = donnees_entree.columns[1]
    def regresse_recursive(indices_actuels=[], debut=0, profondeur=0):
        for i in range(debut, donnees_entree.columns.size):
            nouveaux_indices = indices_actuels + [i]
            if profondeur <= nb_combinaisons :
                colonnes_selectionnees = [donnees_entree.columns[idx] for idx in
nouveaux_indices]
                contient_terme_original = any(terme_original in col for col in
colonnes_selectionnees)
                if contient_terme_original:
                    regresse(donnees_sortie, index_sortie, donnees_entree, nouveaux_indices,
noms_excel, seuils, regressions_sauvegardees)
                    regresse_recursive(nouveaux_indices, i+1, profondeur+1)

            regresse_recursive()

#Fonction qui reçoit un dataframe de données et les indices des paramètres voulus
#Retourne un dataframe avec les colonnes de paramètres et les combinaisons possibles de ces
paramètres
def creer_combinaisons(donnees, indices):
    combinaisons = pd.DataFrame()

    #Ajout des colonnes spécifiées par les indices
    for index in indices:
        combinaisons[donnees.columns[index]] = donnees.iloc[:, index]

    #Toutes les combinaisons possibles des colonnes spécifiées sont générées
    for r in range(2, len(indices) + 1):
        for combo in itertools.combinations(indices, r):
            nom_colonne = '*'.join([donnees.columns[i] for i in combo])
            combinaisons[nom_colonne] = donnees.iloc[:, combo[0]]
            for i in combo[1:]:
                combinaisons[nom_colonne] *= donnees.iloc[:, i]

    return combinaisons

```

```

#Fonction pour ajouter le terme constant à un dataframe
def ajouter_constant(donnees):
    donnees = sm.add_constant(donnees)
    return donnees

#Fonction pour tester les paramètres d'entrée un à la fois sur la sortie
#Les paramètres sont testés avec et sans terme constant
#Seuls les paramètres qui ont un R carré ajusté supérieur au seuil spécifié sont conservés
#Retourne un dataframe avec les paramètres retenus
def tester_un_parametre(donnees_sortie, index_sortie, donnees_entree, seuil):
    parametres_retenus = pd.DataFrame()
    for i in range(0, donnees_entree.columns.size):
        mod = sm.OLS(donnees_sortie.iloc[:,index_sortie],donnees_entree.iloc[:, i],
missing='drop', hasconst=False)
        res = mod.fit()
        if res.rsquared_adj > seuil:
            parametres_retenus = pd.concat([parametres_retenus,
pd.DataFrame(donnees_entree.iloc[:, i])], axis=1)
            continue
        donnees_entree_constant = ajouter_constant(donnees_entree.iloc[:,i])
        mod = sm.OLS(donnees_sortie.iloc[:,index_sortie],donnees_entree_constant,
missing='drop', hasconst=True)
        res = mod.fit()
        if res.rsquared_adj > seuil:
            parametres_retenus = pd.concat([parametres_retenus,
pd.DataFrame(donnees_entree.iloc[:, i])], axis=1)

    #Le nombre de paramètres retenus est affiché
    print("\n" + "Il y a " + str(parametres_retenus.columns.size) + " sur " +
str(donnees_entree.columns.size) + " paramètres retenu(s) après le test un à un")
    return parametres_retenus

#Fonction pour tester les paramètres d'entrée deux à deux sur la sortie
#Les paramètres sont testés avec et sans terme constant
#Seuls les paramètres qui ont un R carré ajusté supérieur au seuil spécifié pour au moins une
combinaison sont conservés
#Retourne un dataframe avec les paramètres retenus
def tester_deux_parametres(donnees_sortie, index_sortie, donnees_entree, seuil):
    parametres_retenus = pd.DataFrame()
    #Liste des paramètres retenus pour les ignorer dans la boucle à l'envers
    liste_parametres_retenus = []
    for i in range(0, donnees_entree.columns.size):
        #Le paramètre est testé seul en premier
        mod = sm.OLS(donnees_sortie.iloc[:,index_sortie],donnees_entree.iloc[:, [i]],
missing='drop', hasconst=False)

```

```

    res = mod.fit()
    if res.rsquared_adj > seuil:
        parametres_retenus = pd.concat([parametres_retenus,
pd.DataFrame(donnees_entree.iloc[:, [i]])], axis=1)
        liste_parametres_retenus.append(i)
        continue
    donnees_entree_constant = ajouter_constant(donnees_entree.iloc[:,i])
    mod = sm.OLS(donnees_sortie.iloc[:,index_sortie],donnees_entree_constant,
missing='drop', hasconst=True)
    res = mod.fit()
    if res.rsquared_adj > seuil:
        parametres_retenus = pd.concat([parametres_retenus,
pd.DataFrame(donnees_entree.iloc[:, [i]])], axis=1)
        liste_parametres_retenus.append(i)
        continue
    for j in range(i+1, donnees_entree.columns.size):
        #Le paramètre est testé avec tous les autres paramètres pour trouver au moins une
combinaison significative
        mod = sm.OLS(donnees_sortie.iloc[:,index_sortie],donnees_entree.iloc[:, [i, j]],
missing='drop', hasconst=False)
        res = mod.fit()
        if res.rsquared_adj > seuil:
            parametres_retenus = pd.concat([parametres_retenus,
pd.DataFrame(donnees_entree.iloc[:, [i]])], axis=1)
            liste_parametres_retenus.append(i)
            break
        donnees_deux_entrees_constant = ajouter_constant(donnees_entree.iloc[:,[i, j]])
        mod = sm.OLS(donnees_sortie.iloc[:,index_sortie],donnees_deux_entrees_constant,
missing='drop', hasconst=True)
        res = mod.fit()
        if res.rsquared_adj > seuil:
            parametres_retenus = pd.concat([parametres_retenus,
pd.DataFrame(donnees_entree.iloc[:, [i]])], axis=1)
            liste_parametres_retenus.append(i)
            break

#La boucle est effectuée dans l'autre sens pour ne pas manquer de combinaisons
#Les paramètres déjà retenus sont ignorés
for i in range(donnees_entree.columns.size - 1, 0, -1):
    if i in liste_parametres_retenus:
        continue
    for j in range(i - 1, 0, -1):
        mod = sm.OLS(donnees_sortie.iloc[:,index_sortie],donnees_entree.iloc[:, [j, i]],
missing='drop', hasconst=False)
        res = mod.fit()

```

```

        if res.rsquared_adj > seuil:
            parametres_retenus = pd.concat([parametres_retenus,
pd.DataFrame(donnees_entree.iloc[:, [i]])], axis=1)
            break
        donnees_deux_entrees_constant = ajouter_constant(donnees_entree.iloc[:,j, i])
        mod = sm.OLS(donnees_sortie.iloc[:,index_sortie],donnees_deux_entrees_constant,
missing='drop', hasconst=True)
        res = mod.fit()
        if res.rsquared_adj > seuil:
            parametres_retenus = pd.concat([parametres_retenus,
pd.DataFrame(donnees_entree.iloc[:, [i]])], axis=1)
            break

#Le nombre de paramètres retenus est affiché
print("Il y a " + str(parametres_retenus.columns.size) + " sur " +
str(donnees_entree.columns.size) + " paramètres retenu(s) après le test deux à deux" + "\n")
return parametres_retenus

```

Algorithme V-3 Interactions.py

```
#Ce fichier comporte les fonctions pour interagir avec l'utilisateur

#Auteur : Martin Chaveca
#Date : Hiver 2025
#Programme : Python 3.10.6
#Ce programme a été écrit dans le cadre d'une maîtrise avec mémoire en génie mécanique à
l'École de technologie supérieure (ÉTS)
#Les intelligences artificielles suivantes ont été utilisées pour aider à la rédaction du code, de
la syntaxe et de l'optimisation :
#ChatGPT 4.0 (OpenAI, 2025), Copilot (GitHub, 2025), Claude Sonnet 3.7
(Anthropic, 2025)
#La logique du programme et des fonctions a été écrite par l'auteur

#Importation des librairies standards
import os
import numpy as np
import pandas as pd

#Fonction pour retourner le dictionnaire des dataframes d'entrée et de sortie et le paramètre
de sortie
def creer_parametres_entree_sortie(entree_default, sortie_default, feuille_entree_default,
feuille_sortie_default):
    if utiliser_default("les données Excel"):
        entree = pd.read_excel(entree_default, sheet_name=feuille_entree_default)
        sortie = pd.read_excel(sortie_default, sheet_name=feuille_sortie_default)
        parametre_sortie = choisir_colonne(sortie)
        return {'entree': entree, 'sortie': sortie, 'parametre_sortie': parametre_sortie}
    entree = definir_fichier_excel("entrée")
    sortie = definir_fichier_excel("sortie")
    parametre_sortie = choisir_colonne(sortie)
    return {'entree': entree, 'sortie': sortie, 'parametre_sortie': parametre_sortie}

#Fonction pour demander à l'utilisateur s'il veut utiliser les paramètres par défaut
#Retourne True si les paramètres par défaut sont utilisés, False sinon
#Une liste des paramètres peut être affichée
def utiliser_default(parametres, listes_parametres=""):
    print("\n" + "Voulez-vous utiliser " + parametres + " par défaut? (0 pour oui, autre chose
pour non)")
    if listes_parametres:
        print(listes_parametres)
    choix = input()
    if choix == '0' :
        return True
    else:
```



```

    return False

#Fonction pour demander à l'utilisateur de définir les seuils statistiques pour les régressions
#Retourne un dictionnaire contenant les seuils
def definir_seuils(seuils):
    if utiliser_defaut("les seuils",
        "Test à un paramètre: " + str(seuils['un_parametre']) + "\n" +
        "Test à deux paramètres: " + str(seuils['deux_parametres']) + "\n" +
        "Test R^2 de régression: " + str(seuils['r']) + "\n" +
        "Test F: " + str(seuils['f_test']) + "\n" +
        "Test P-value des coefficients: " + str(seuils['p_value_coefficients']) + "\n" +
        "Test d'homoscédasticité Breusch-Pagan: " + str(seuils['bp']) + "\n" +
        "Test de normalité des résidus (Anderson-Darling): " + str(seuils['ad']) + "\n"
    +
        "Test d'autocorrélation des résidus min (Durbin-Watson): " +
    str(seuils['dw_min']) + "\n" +
        "Test d'autocorrélation des résidus max (Durbin-Watson): " +
    str(seuils['dw_max']) + "\n" +
        "Test des valeurs abberantes des résidus: " + str(seuils['residus_abberants']) +
    "\n" +
        "Test de multicollinéarité VIF: " + str(seuils['vif']) + "\n" +
        "Score requis: " + str(seuils['score_regression'])):
        return seuils
    print("Entrez le seuil R^2 pour le test à un paramètre")
    seuils['un_parametre'] = float(input())
    print("Entrez le seuil R^2 pour le test à deux paramètres")
    seuils['deux_parametres'] = float(input())
    print("Entrez le seuil R^2 pour le test de régression")
    seuils['r'] = float(input())
    print("Entrez le seuil F")
    seuils['f_test'] = float(input())
    print("Entrez le seuil P-value des coefficients")
    seuils['p_value_coefficients'] = float(input())
    print("Entrez le seuil de Breusch-Pagan")
    seuils['bp'] = float(input())
    print("Entrez le seuil d'Anderson-Darling")
    seuils['ad'] = float(input())
    print("Entrez le seuil min de Durbin-Watson")
    seuils['dw_min'] = float(input())
    print("Entrez le seuil max de Durbin-Watson")
    seuils['dw_max'] = float(input())
    print("Entrez le seuil des valeurs abberantes des résidus")
    seuils['residus_abberants'] = float(input())
    print("Entrez le seuil VIF")
    seuils['vif'] = float(input())

```

```

print("Entrez le score requis")
seuils['score_regression'] = float(input())
return seuils

#Fonction pour demander à l'utilisateur le nombre de paramètres et termes maximums à
considérer dans les régressions
#Retourne un dictionnaire contenant le nombre de paramètres et de termes maximums
def definir_nb_parametres(nb_parametres):
    if utiliser_defaut("le nombre de paramètres",
        "Nombre de paramètres: " + str(nb_parametres['parametres_combines']) + "\n"
+
        "Nombre maximal de termes dans la régression : " +
str(nb_parametres['termes_max'])):
        return nb_parametres
    print("Entrez le nombre de paramètres à considérer")
    nb_parametres['parametres_combines'] = int(input())
    print("Entrez le nombre maximal de termes à considérer")
    nb_parametres['termes_max'] = int(input())
    return nb_parametres

#Fonction pour retourner le dataframe du fichier Excel choisi par l'utilisateur
def definir_fichier_excel(entree_sortie):
    fichier = choisir_fichier_excel(entree_sortie)
    feuille = choisir_feuille_excel(fichier)
    return pd.read_excel(fichier, sheet_name=feuille)

#Fonction pour lister les fichiers Excel dans le répertoire courant et les sous-répertoires
#Retourne la liste des fichiers Excel trouvés
def lister_fichiers_excel():
    liste_fichiers = []
    for root, dirs, files in os.walk("."):
        for file in files:
            if file.endswith(".xlsx"):
                liste_fichiers.append(file)
    return liste_fichiers

#Fonction pour demander à l'utilisateur de choisir un fichier Excel parmi ceux listés
#Retourne le nom du fichier choisi
def choisir_fichier_excel(entree_sortie):
    liste_fichiers = lister_fichiers_excel()
    print("Choisissez un fichier Excel parmi les suivants comme " + entree_sortie + ":")
    for i in range(0, len(liste_fichiers)):
        print(str(i) + " - " + liste_fichiers[i])
    choix = input()
    return liste_fichiers[int(choix)]

```

```

#Fonction pour demander à l'utilisateur de choisir une feuille Excel parmi celles listées
#Retourne le nom de la feuille choisie
def choisir_feuille_excel(nom_fichier):
    print("Choisissez une feuille Excel parmi les suivantes:")
    feuilles = pd.ExcelFile(nom_fichier).sheet_names
    for i in range(0, len(feUILLES)):
        print(str(i) + " - " + feuilles[i])
    choix = input()
    return feuilles[int(choix)]

#Fonction pour demander à l'utilisateur de choisir une colonne de données parmi celles listées
#Retourne l'index de la colonne choisie
def choisir_colonne(donnees):
    print("Choisissez une colonne de données:")
    for i in range(0, donnees.columns.size):
        print(str(i) + " - " + str(donnees.columns[i]))
    choix = input()
    return int(choix)

#Fonction pour créer le fichier Excel qui contiendra les résultats des régressions
#Retourne une liste de chaînes de caractères qui contient le nom du fichier, le nom de la feuille et le compteur de feuilles
def creer_fichier_excel(nom_sortie, seuils, nb_parametres):
    nom_fichier = f'Resultats_regressions_{nom_sortie}.xlsx'
    #Vérification si le fichier existe déjà
    if os.path.exists(nom_fichier):
        raise Exception("Le fichier existe déjà")
    nom_feuille = 'Feuille'
    compteur_feuille = '1'
    liste_de_noms = [nom_fichier, nom_feuille, compteur_feuille]
    #Sauvegarde des seuils dans la première feuille
    premiere_feuille = pd.DataFrame({"Nombre de paramètres considérés" :
[nb_parametres['parametres_combines']],
    "Nombre de termes maximal" : nb_parametres['termes_max'],
    "Seuil pour un paramètre" : [seuils['un_parametre']],
    "Seuil pour deux paramètres" : [seuils['deux_parametres']],
    "Seuil pour R" : [seuils['r']],
    "Seuil pour F" : [seuils['f_test']],
    "Seuil pour P-value des coefficients" : [seuils['p_value_coefficients']],
    "Seuil pour Breusch-Pagan" : [seuils['bp']],
    "Seuil pour Anderson-Darling" : [seuils['ad']],
    "Seuil min pour Durbin-Watson" : [seuils['dw_min']],
    "Seuil max pour Durbin-Watson" : [seuils['dw_max']]},

```

```

                                "Seuil des valeurs abberantes des résidus" :
[seuils['residus_abberants']],
                                "Seuil pour VIF" : [seuils['vif']],
                                "Seuil pour le score de régression" : [seuils['score_regression']],
                                })
#Création du fichier Excel
premiere_feuille.to_excel(nom_fichier, sheet_name='Initialisation', index=False)
return liste_de_noms

#Fonction pour écrire les colonnes des paramètres d'une régression dans une feuille du fichier
Excel
#Le compteur de feuilles est incrémenté à chaque fois qu'une régression est écrite
def ecrire_parametres(parametres, noms_excel):
    with pd.ExcelWriter(noms_excel[0], mode='a') as writer:
        parametres.to_excel(writer, sheet_name = noms_excel[1] + noms_excel[2])
        noms_excel[2] = (str)(int(noms_excel[2]) + 1)

```

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aggerbeck, M., Canulescu, S., Dirscherl, K., Johansen, V. E., Engberg, S., Schou, J., & Ambat, R. (2014). Appearance of anodised aluminium: Effect of alloy composition and prior surface finish. *Surface and Coatings Technology*, 254, 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.05.047>
- Aidibe, A. (2015). Overview Surface Topography. MEC602 : Tolérancement et métrologie tridimensionnelle. École de technologie supérieure.
- Anderson, T. W., & Darling, D. A. (1952). Asymptotic Theory of Certain « Goodness of Fit » Criteria Based on Stochastic Processes. *The Annals of Mathematical Statistics*, 23(2), 193-212.
- Anthropic. (2025). Claude (version Claude 3.7 Sonnet). [Grand modèle de langage]. Repéré à <https://claude.ai/chat>
- Ashrafi, S. A., Davoudinejad, A., & Niazi, A. (2013). Investigations into Effect of Tool Wear on Surface Integrity in Dry Turning of Al6061. *Advanced Materials Research*, 622-623, 375-379. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.622-623.375>
- ASME. (2019). *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)*. Norme ASME B46.1. Repéré à <https://asmestandardscollection.org/GetDoc.aspx?doc=ASME%20B46.1%202019>
- ASTM. (2008). *Standard Test Method for Specular Gloss*. Norme ASTM D523-89(2008). Repéré à <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CD0523-89R08%7Cen-US>
- Babaniaris, S., Beer, A. G., & Barnett, M. R. (2019). Optical and Microstructural Origins of Thermomechanical Streaking Defects in Hot Extruded AA6060. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(11), 5483-5493. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05428-1>
- Baek, D. K., Ko, T. J., & Kim, H. S. (2001). Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(3), 451-462. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00039-0)
- Beck, G., & Funk, S. (2012). Correlation between optical appearance and orientation of aluminium. *Surface and Coatings Technology*, 206(8), 2371-2379. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.10.034>

- Benardos, P. G., & Vosniakos, G.-C. (2003). Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(8), 833-844. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2)
- Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1980). The Lagrange Multiplier Test and its Applications to Model Specification in Econometrics. *The Review of Economic Studies*, 47(1), 239-253. <https://doi.org/10.2307/2297111>
- Chadwick, A. C., & Kentridge, R. W. (2015). The perception of gloss: A review. *Vision Research*, 109, 221-235. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2014.10.026>
- DeFelsko. (2022). PosiTector GLS Gloss Meter. Repéré à https://dl.defelsko.com/pdf/literature/PosiTectorGLS.pdf?_gl=1*10gpdf4*_gcl_au*MTE3MDEzNjM4My4xNzQwMzI1MDM1
- de Sousa Araujo, J. V., Milagre, M., & Costa, I. (2023). A historical, statistical and electrochemical approach on the effect of microstructure in the anodizing of Al alloys: a review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 1-61. <https://doi.org/10.1080/10408436.2023.2230250>
- Diggle, J. W., Downie, T. C., & Goulding, C. W. (1969). Anodic oxide films on aluminum. *Chemical Reviews*, 69(3), 365-405. <https://doi.org/10.1021/cr60259a005>
- Diniz, A. E., & Filho, J. C. (1999). Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process. *Wear*, 232(1), 67-75. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00159-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00159-3)
- Durbin, J., & Watson, G. S. (1951). Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression. II. *Biometrika*, 38(1/2), 159-177. <https://doi.org/10.2307/2332325>
- Ehmann, K. F., & Hong, M. S. (1994). A Generalized Model of the Surface Generation Process in Metal Cutting. *CIRP Annals*, 43(1), 483-486. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62258-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62258-6)
- Fergani, O., Shao, Y., & Liang, S. Y. (2014). Effect of Temperature on the Subsurface Microstructure and Mechanical Properties of AA 7075-T6 in Machining. *Procedia CIRP*, 13, 181-185. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.031>
- Forsyth, P. J. E. (1993). Some further observations on the various features of aluminium alloy microstructures that are transferred, bodily, into the oxide coating formed by anodising. *Materials Letters*, 16(2), 113-122. [https://doi.org/10.1016/0167-577X\(93\)90034-U](https://doi.org/10.1016/0167-577X(93)90034-U)

- Gigilashvili, D., Shi, W., Wang, Z., Pedersen, M., Hardeberg, J. Y., & Rushmeier, H. (2021). The Role of Subsurface Scattering in Glossiness Perception. *ACM Transactions on Applied Perception*, 18(3), 1-26. <https://doi.org/10.1145/3458438>
- GitHub. (2025). *GitHub Copilot*. [Assistance à la programmation avec intelligence artificielle]. Repéré à <https://github.com/features/copilot>
- Grubbs, C. A. (2007). Anodizing of aluminum. *Metal Finishing*, 105(10), 397-412. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(07\)80359-X](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(07)80359-X)
- Grubbs, F. E. (1969). Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*, 11(1), 1-21. <https://doi.org/10.2307/1266761>
- Grzesik, W. (1996). A revised model for predicting surface roughness in turning. *Wear*, 194(1), 143-148. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06825-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06825-2)
- Grzesik, W. (2008). Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools. *Wear*, 265(3), 327-335. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.11.001>
- Horn, B. K. P., & Sjöberg, R. W. (1979). Calculating the reflectance map. *Applied Optics*, 18(11), 1770-1779. <https://doi.org/10.1364/AO.18.001770>
- ISO. (2021). *Anodizing of aluminium and its alloys : Measurement of specular reflectance and specular gloss of anodic oxidation coatings at angles of 20°, 45°, 60° or 85°*. Norme ISO 7668. <https://doi.org/10.3403/30429621>
- Jesuthanam, C., & Pratheesh, S. (2019). Machining Parameter optimization by using Taguchi Technique for CNC turning of Grade T6 Aluminium alloy. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9. <https://doi.org/10.35940/ijitee.B7027.129219>
- Karakoç, E., & Çakır, O. (2023). Examination of surface roughness values of 6061-T6 aluminum material after machining and after anodizing process. *Materials Today: Proceedings*, 80, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.058>
- Korzekwa, J. (2023). Modification of the structure and properties of oxide layers on aluminium alloys: A review. *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE*, 62(1). <https://doi.org/10.1515/rams-2023-0108>
- Kwon, H., & Yoh, J. J. (2012). Polarized reflectance of aluminum and nickel to 532, 355 and 266 nm Nd:YAG laser beams for varying surface finish. *Optics & Laser Technology*, 44(6), 1823-1828. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.02.014>

- Lee, H. J. (2019). Simple Regression Model for Estimating Reflectance Reduction due to Random Surface Roughness. *International Journal of Thermophysics*, 40(6), 55. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2523-3>
- Li, L. H., Yu, N. H., Chan, C. Y., & Lee, W. B. (2018). Al6061 surface roughness and optical reflectance when machined by single point diamond turning at a low feed rate. *PLoS ONE*, 13(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195083>
- Litsikas, M. (1997). Eyes have it when it comes to gloss. *Quality*, 36(11), 42-45.
- Ma, Y., Zhou, X., Thompson, G. E., Nilsson, J.-O., Gustavsson, M., & Crispin, A. (2013). Anodizing of AA6063 aluminium alloy profiles: Generation of dark appearance. *Surface and Interface Analysis*, 45(10), 1479-1484. <https://doi.org/10.1002/sia.5219>
- Ma, Y., Zhou, X., Thompson, G. E., Nilsson, J.-O., Gustavsson, M., & Crispin, A. (2013). Origin of streaks on anodised aluminium alloy extrusions. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 91(1), 11-16. <https://doi.org/10.1179/0020296712Z.000000000075>
- Ma, Y., Zhou, X., Wang, J., Thompson, G. E., Huang, W., Nilsson, J.-O., ... Crispin, A. (2014). Discoloration of anodized AA6063 aluminum alloy. *Journal of the Electrochemical Society*, 161(6), C312-C320. <https://doi.org/10.1149/2.065406jes>
- Martins, P. S., Gonçalves Carneiro, J. R., Ba, E. C. T., & Vieira, V. F. (2021). Study on roughness and form errors linked with tool wear in the drilling process of an Al-Si alloy under high cutting speed using coated diamond-like carbon high-speed steel drill bits. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 711-719. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.006>
- Mitutoyo. (2015). Portable surface roughness tester surfest SJ-410 series. Repéré à https://www.mitutoyo.ca/webfoo/wp-content/uploads/2110_SJ-410.pdf
- Najiha, M. S., Rahman, M. M., & Kadirgama, K. (2015). MACHINING PERFORMANCE OF ALUMINUM ALLOY 6061-T6 ON SURFACE FINISH USING MINIMUM QUANTITY LUBRICATION. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 11, 2699-2712. <https://doi.org/10.15282/ijame.11.2015.46.0227>
- Ofoegbu, S. U., Fernandes, F. A. O., & Pereira, A. B. (2020). The Sealing Step in Aluminum Anodizing: A Focus on Sustainable Strategies for Enhancing Both Energy Efficiency and Corrosion Resistance. *Coatings*, 10(3), 226. <https://doi.org/10.3390/coatings10030226>
- Ohno, H. (2024). One-shot reflectance direction color mapping for identifying surface roughness. *Precision Engineering*, 85, 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.09.004>

- Ohno, H., & Kamikawa, T. (2021). One-shot BRDF imaging system to obtain surface properties. *Optical Review*, 28(6), 655-661. <https://doi.org/10.1007/s10043-021-00689-x>
- OpenAI. (2025). ChatGPT (version GPT-4). [Grand modèle de langage]. Repéré à <https://chatgpt.com/>
- Peiponen, K.-E., & Tsuboi, T. (1990). Metal surface roughness and optical reflectance. *Optics & Laser Technology*, 22(2), 127-130. [https://doi.org/10.1016/0030-3992\(90\)90022-V](https://doi.org/10.1016/0030-3992(90)90022-V)
- Pimenov, D. Y., Kiran, M., Khanna, N., Pintaude, G., Vasco, M. C., da Silva, L. R. R., & Giasin, K. (2023). Review of improvement of machinability and surface integrity in machining on aluminum alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(11), 4743-4779. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12630-4>
- Prakash, P. B., Raju, K. B., Subbaiah, K. V., Krishnamachary, P. C., ManiKandan, N., & Ramya, V. (2018). Application of Taguchi based Grey Method for Multi Aspects Optimization on CNC Turning of AlSi7 Mg. *Materials Today: Proceedings*, 5(6, Part 2), 14292-14301. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.03.011>
- Saenz de Miera, M., Curioni, M., Skeldon, P., & Thompson, G. E. (2010). The behaviour of second phase particles during anodizing of aluminium alloys. *Corrosion Science*, 52(7), 2489-2497. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.03.029>
- Šarić, D., & Sole, A. S. (2023). Visually Significant Dimensions and Parameters for Gloss. *Journal of Imaging*, 10(1), 10. <https://doi.org/10.3390/jimaging10010010>
- Scampone, G., & Giulio, T. (2024). Effect of surface roughness and eutectic segregation on anodising of Al-Si-Cu alloys. *Materials Science and Technology*, 0(0). <https://doi.org/10.1177/02670836241245205>
- Scampone, G., & Timelli, G. (2022). Anodizing Al–Si Foundry Alloys: A Critical Review. *Advanced Engineering Materials*, 24(4). <https://doi.org/10.1002/adem.202101480>
- Senel, E., & Hallenstvet, M. (2014). Effect of Alloying Elements on the Colour Development of Anodised Al-Mg-Si Alloys. *Materials Science Forum*, 794-796, 247-252. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.794-796.247>
- Simonsen, I., Larsen, Å. G., Andreassen, E., Ommundsen, E., & Nord-Varhaug, K. (2005). Estimation of gloss from rough surface parameters. *physica status solidi (b)*, 242(15), 2995-3000. <https://doi.org/10.1002/pssb.200562235>

- Srivastava, V. S., Gupta, T. K., Srivastava, A. K., Chauhan, S., & Chauhan, P. K. (2021). Effects of cutting parameters on aluminium alloys-A review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 3823-3827. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.091>
- United States Department of Defense. (2020). *Anodic Coatings for Aluminum and Aluminum Alloy*. Norme USDD MIL-PRF-8625. Repéré à https://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=7074
- Wong, Y. H., Affendy, M. G., Lau, S. K., Teh, P. C., Lee, H. J., Tan, C. Y., & Ramesh, S. (2017). Effects of anodisation parameters on thin film properties: A review. *Materials Science and Technology*, 33(6), 699-711. <https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1193654>
- Yonehara, M., Matsui, T., Kihara, K., Isono, H., Kijima, A., & Sugibayashi, T. (2004). Experimental Relationships between Surface Roughness, Glossiness and Color of Chromatic Colored Metals. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 45(4), 1027-1032. <https://doi.org/10.2320/matertrans.45.1027>
- Zhu, H., Couper, M. J., & Dahle, A. K. (2012). Effect of Process Variables on the Formation of Streak Defects on Anodized Aluminum Extrusions: An Overview. *High Temperature Materials and Processes*, 31(2), 105-111. <https://doi.org/10.1515/htmp-2012-0024>
- Zhu, H., Zhang, X., Couper, M. J., & Dahle, A. K. (2009). Effect of initial microstructure on surface appearance of anodized aluminum extrusions. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 40(13), 3264-3275. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-9976-0>
- Zohuri, B. (2021). *Thermal effects of high power laser energy on materials*. Cham : Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-63064-5>